



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

vm 108

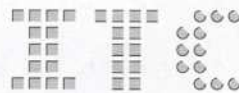
VAN



Corrosiebestendige en slijtvaste oppervlaktelagen door oplassen en thermisch spuiten

november 1997

vm 108



Bond voor Materialenkennis



FME CWM

Vereniging FME-CWM

vereniging van ondernemingen in de
metaal-, kunststof-, elektronica- en elektrotechnische
industrie en aanverwante sectoren

Boerhaavelaan 40

Postbus 190, 2700 AD Zoetermeer

Telefoon (079) 353 11 00

Telefax (079) 353 13 65

E-mail: alg@fme.nl

Internet: <http://www.fme.nl>

© Vereniging FME-CWM/november 1997

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 Technische Zaken
Postbus 190, 2700 AD Zoetermeer
telefoon 079 - 353 11 00
telefax 079 - 353 13 65
E-mail: pbo@fme.nl
internet: <http://www.fme.nl>

ISBN 90-75740-08-5

Corrosiebestendige en slijtvaste oppervlaktelagen

toelichting:

Het Nederlands Instituut voor Lastechniek heeft, na een gedegen inventarisatie, een aantal door een deel van de Nederlandse industrie gesponsorde onderzoeksprojecten laten uitvoeren. In het kader van de voorliggende voorlichtingspublicatie "Corrosiebestendige en slijtvaste oppervlaktelagen" moeten als projecten genoemd worden "Oplassen van corrosievaste en slijtvaste lagen" en "Thermisch spuiten".

Naast fundamentele research zijn in beide, onafhankelijk van elkaar uitgevoerde, onderzoeken uitgebreide literatuurstudies verricht. De resultaten van de onderzoeken, alsmede deze studies hebben een schat aan informatie opgeleverd, waarvan het zonde zou zijn indien deze niet op brede schaal kenbaar zou worden gemaakt.

Aldus is het idee ontstaan deze resultaten te verzamelen en te bundelen in de voorliggende voorlichtingspublicatie. Hiertoe zijn de beide auteurs, ing. J.E. Buter en ing. Th. Verheiden EWE bereid gevonden. Zij hebben, in samenspraak met een "begeleidingsgroep", de voorlichtingspublicatie vorm en inhoud gegeven.

De voorzitters van de stuurgroepen van beide onderzoeksprojecten zijn van mening dat er een waardevol boekwerk is ontstaan dat in de behoefte aan kennis omtrent het aanbrengen van (metallische) bedekkingslagen voorziet. Zij hopen dan ook dat deze voorlichtingspublicatie zijn weg in de Nederlandse industrie zal vinden en dat velen hiermee geholpen worden bij de selectie van een oppervlakte bedekkingstechniek teneinde corrosie en/of slijtage te voorkomen of te repareren. Zij danken de beide auteurs voor het vele werk dat door hen is verricht in een relatief korte tijd, hetgeen heeft geresulteerd in deze waardevolle voorlichtingspublicatie.

auteurs:

ing. J.E. Buter
ing. Th.J. Verheiden

Stork FDO B.V.
v/h Hoogovens Staal B.V.

begeleidingsgroep:

Adviseur (v/h Hoogovens Staal B.V.), Heemskerk	Th.J. Verheiden
C.W.P., Bladel / PMP, Apeldoorn	W.G. Essers
Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN), Petten	P. van Tilborg
General Electric Plastics B.V., Bergen op Zoom	A. Uyttenbroek
Hoogovens Groep B.V., IJmuiden	W. Hadders
Revamo Vlamspuittechniek, Meppel	R. Rijkmans
Soudometal B.V., Haarlem	W. Pors
Stork FDO B.V., Amsterdam	J.E. Buter
TU Eindhoven, Eindhoven	P. de Waal
Vereniging FME-CWM, Zoetermeer	P. Boers
Welding Alloys Nederland, Beverwijk	R. Kamperveen

Al deze bedrijven/instellingen hebben een bijdrage geleverd aan het opstellen van deze VM-publicatie. ITC van de Vereniging FME-CWM en het Ministerie van Economische Zaken hebben in belangrijke mate bijgedragen aan de financiering van dit project.

technische informatie:

Nederlands Instituut voor Lastechniek	
- bezoekadres en correspondentie-adres	Krimkade 20, 2251 KA Voorschoten
- telefoon	071 - 561 12 11
- telefax	071 - 561 14 26
- e-mail	info@nil.nl
- internet	http://www.nil.nl

informatie over en bestelling van VM-publicaties:

Vereniging FME-CWM / Industrieel Technologie Centrum (ITC)	
- bezoekadres	Boerhaavelaan 40, Zoetermeer
- correspondentie-adres	Postbus 190, 2700 AD ZOETERMEER
- telefoon	079 - 353 13 41 / 353 11 00
- telefax	079 - 353 13 65
- e-mail	pbo@fme.nl
- internet	http://www.fme.nl

Bond voor Materialenkennis	
- correspondentie-adres	Postbus 390, 3330 AJ ZWIJNDRECHT
- telefoon	078 - 619 26 55
- telefax	078 - 619 57 35

Inhoud

	blz		blz
1	5	5	36
2	6	5.1	36
2.1	6	5.1.1	36
2.1.1	6	5.1.2	36
2.1.2	6	5.1.3	37
2.1.3	7	5.1.4	37
2.1.4	8	5.2	37
2.1.5	8	5.2.1	38
2.2	10	5.2.2	39
2.2.1	10	5.2.3	39
2.2.2	10	5.2.4	40
2.2.3	11	5.2.5	40
2.2.4	12	5.3	40
2.2.5	13	6	43
2.3	13	6.1	43
2.4	13	6.1.1	43
3	15	6.1.2	47
3.1	15	6.2	52
3.1.1	15	6.2.1	52
3.1.2	15	6.2.2	53
3.1.3	15	7	54
3.1.4	16	7.1	54
3.1.5	16	7.2	68
3.1.6	17	7.3	71
3.1.7	17	7.3.1	71
3.2	17	7.3.2	71
3.2.1	17	7.3.3	73
3.2.2	19	7.3.4	74
3.2.3	20	8	75
3.2.4	21	9	76
3.2.5	21	9.1	76
3.2.6	22	9.2	81
3.3	22	Bijlage 1	86
3.3.1	22	Bijlage 2	92
3.3.2	26	Trefwoordenlijst	93
3.3.3	26	Verantwoording	98
3.3.4	27		
3.3.5	27		
4	28		
4.1	28		
4.1.1	28		
4.1.2	28		
4.1.3	28		
4.2	29		
4.3	30		
4.3.1	31		
4.3.2	32		
4.3.3	33		
4.3.4	33		
4.3.5	34		

Hoofdstuk 1

Inleiding

Slijtage en corrosie veroorzaken jaarlijks een grote kapitaalvernietiging. Dit verlies is niet alleen het gevolg van materiaalverliezen. Ook de gevolgschade en de loonkosten om de opgedane schade weer teniet te doen, spelen een zeer belangrijke rol. De geschatte grootte van de verliezen per jaar over de gehele wereld bedragen voor:

Corrosie → 900 miljard US \$;

Slijtage → 300 miljard US \$.

Om deze verliezen terug te dringen is kennis van de slijtage- en corrosiemechanismen noodzakelijk. Afhankelijk van de industrietakken kan het accent meer op de corrosie liggen (bijvoorbeeld petrochemie) of op de slijtage (bijvoorbeeld metallurgie). Een goede diagnose van de schade en de onderliggende oorzaken is moeilijk. Daarmee is ook het vinden van goede oplossingen voor het probleem vaak lastig. Deze publicatie beoogt hiervoor een leidraad te vormen.

Als uitgangspunt is gekozen voor het veranderen van de eigenschappen van het oppervlak door het opbrengen van lagen. Het oppervlak bedekken zodat het goed past bij de werkomstandigheden wordt niet alleen technisch, maar ook economisch steeds belangrijker. In het bijzonder indien dure massieve materialen vervangen kunnen worden door goedkopere materialen. Oppervlaktetechnieken omvatten alle aspecten van de productie. Kenschetsing en het gebruik van oppervlakken in de techniek en tribologie is een deel van het scenario. Een grote variëteit aan technieken wordt nu gebruikt, inclusief recent ontwikkelde processen zoals opdampen, ionenimplantatie, laserbehandelingen, enz. De grote verscheidenheid en de gecompliceerdheid van materialen en processen die nu beschikbaar zijn, maken de keus van een geschikte combinatie buitengewoon moeilijk. Deze publicatie richt zich in het bijzonder op de technicus, die niet kan beschikken over een deskundige, zonder dat wordt beoogd deze volledig te vervangen. Voor complexe problemen zal de steun van een deskundige altijd nodig blijven. In dergelijke gevallen wordt dan wel bereikt dat de diagnose van het probleem en de oplossingen gemakkelijker te begrijpen en te bespreken zijn. Om de duidelijkheid niet uit het oog te verliezen is er bewust voor gekozen deze VM-publicatie te beperken tot oplassen en thermisch spuiten, omdat hiermee voor een breed spectrum van problemen in de industrie goede oplossingen worden gevonden.

Hierbij komt het volgende aan de orde:

- *omgaan met het enorm 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 garanties op succes kunnen worden gegeven zonder aandacht voor kwaliteitsborging.*

In hoofdstuk 2 wordt informatie gegeven over de aard en oorzaken van oppervlakteproblemen met een kort

overzicht van mogelijke oplossingen. Hoofdstuk 3 gaat dieper in op de oorzaken en verschijningsvormen van slijtage en corrosie, de twee belangrijkste problemen in de industrie. Daarnaast geeft het informatie over de eisen die aan de ondergrond worden gesteld, voordat er een laag op kan worden aangebracht. Tenslotte wordt in dit hoofdstuk ingegaan op de relaties tussen deklaagopbouw en eigenschappen, alsmede de manier waarop een deklaag kan worden beschreven (gekaracteriseerd). Daarmee wordt inzicht verkregen in het gebruik van testen die in hoofdstuk 4 worden beschreven. Het kiezen van de juiste test is net zo moeilijk als het kiezen van de juiste deklaag; reden waarom in dit hoofdstuk eerst wordt verteld met welke verschillende bedoelingen testen kunnen worden uitgevoerd en welke testen hierbij passen. Hierbij wordt ook de waarde van aparte proefstukken toegelicht.

De materialen voor oplassen en thermisch spuiten worden beschreven in hoofdstuk 6. Het materiaal-aanbod is groot en voor veel toepassingen onnodig gedifferentieerd. Daarom beperkt de opsomming zich tot de algemeen, bij meerdere leveranciers verkrijgbare materialen. De toegevoegde waarde van het aanbod aan speciale deklaagmaterialen kan dan worden gevonden door ze hier tegen af te zetten. Daarom wordt ook de rol die het proces hierbij speelt toegelicht in hoofdstuk 5, dat een kort overzicht geeft van de in aanmerking komende las- en spuitprocessen.

Hoofdstuk 7 tenslotte biedt een stramien voor het stapsgewijs verzamelen van informatie en het nemen van beslissingen die documenteerbaar zijn (kwaliteitsbeheer). Hierin zijn ook referentiegegevens en -beelden voor de verschillende fenomenen opgenomen.

In hoofdstuk 9 tenslotte zijn enkele voorbeelden uit de praktijk verzameld.

Hoofdstuk 2

Algemeen

2.1 Oppervlakte-eigenschappen/-eisen

2.1.1 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 wel een ander basismateriaal gekozen, maar vanuit een verkeerd standpunt en kiest men bijvoorbeeld voor oplossingen als een corrosievaste deklaag met eronder een austenitisch roestvast 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 condities, of men gaat alleen af op informatie van leveranciers. Gedreven door commerciële belangen is men soms geneigd meer te beloven dan men waar kan maken in de hoop op een toevalstreffer. Kwaliteitsonderzoek 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 men eerst moet weten welke eisen de toepassing aan het oppervlak stelt en welke mate deze moeten reproduceren. Een voorbeeld zal duidelijk maken wat hier wordt bedoeld.

In veel gevallen 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 bepaald door factoren zoals:

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

Deze opsomming zal duidelijk maken dat voor een 'representatief' proefstukje aan veel oppervlakte-details 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. Veel hangt dus af van de ervaring. Dit illustreert dan ook duidelijk de noodzaak om resultaten van testen zeer

zorgvuldig te interpreteren. Een eenmaal hierop gebaseerde keus moet onder actuele praktijkcondities worden geverifieerd door testen op volle schaal. Doet men dit niet, dan blijft de onzekerheid. Men dient zich dan te blijven realiseren dat het gereede product zich feitelijk in een testfase bevindt en dat men eventueel afwijkend gedrag goed analyseert. Moet een product echter in één keer slagen, dan is het noodzakelijk eerst op kleinere schaal proeven te doen. Het is gewenst de belangrijkste aspecten apart te bekijken, waarbij samenwerking met het oplos- of spuitbedrijf voorop dient te 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 4 geeft meer informatie over het testen.

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

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

De mechanische voorbereiding van de ondergrond is dus 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. Hiervoor moet worden teruggevallen op 'slimmigheden'. Zo is het gevolg van gritstralen goed zichtbaar te maken door de kromming van een plaatje van voorgeschreven dikte na éénzijdig stralen te bekijken, wat kan worden uitgedrukt in de "Almen" waarde (booghoogte). Door toe te werken naar een van tevoren vastgestelde index kan het straalproces worden 'ingesteld'. Als de ondergrond met behulp van een dergelijke benadering wordt voorbereid, is de kans op een slechte hechting en scheurvorming door verkeerde restspanningen gering. De noodzaak voor een dergelijke, vaak duurdere werkwijze, dient te worden afgewogen tegen de gevolgen van het falen van de deklaag.

Het komt ook voor dat het proces weliswaar reproduceert 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'.

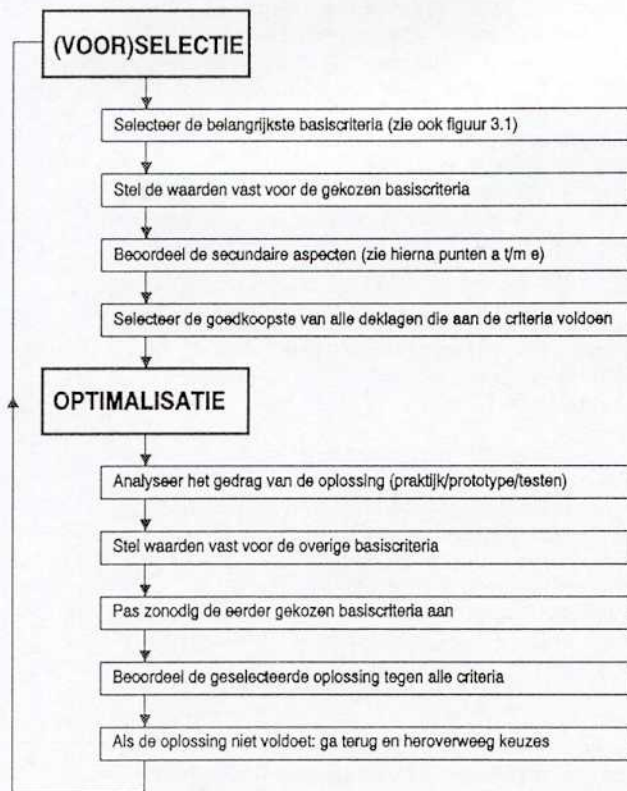
Tenslotte komt het veelvuldig voor dat er onvoldoende kennis is van de bedrijfsomstandigheden, laat staan van de wijze waarop de behandeling op deze omstandigheden reageert. Dit heeft ertoe geleid dat er een groot aantal mislukkingen te vinden is.

2.1.2 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 2.1 waarbij de volgende 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 2.1 Stapsgevijs kiezen

De meeste criteria zijn te kwantificeren op basis van normale ontwerpinzichten. De criteria 3 en 4 kunnen met behulp van hoofdstuk 6 van deze voorlichtingspublicatie worden bepaald. Criterium 5 vraagt optimalisatie van het ontwerp tegen de mogelijkheden van de deklaag (zie ook hoofdstuk 5). De criteria 2 en 9 t/m 12 bepalen hoe het product zich zal gedragen bij corrosie en slijtage, waarvoor hoofdstuk 3 achtergrondinformatie geeft. Bekijk vooral figuur 3.1 goed om te bepalen wat voor een bepaalde toepassing de belangrijkste aspecten kunnen zijn. Hoofdstuk 7 geeft verder algemene aanwijzingen voor het oplossen van corrosie- en slijtageproblemen met deklagen. Voor meer specifieke problemen kunnen leveranciers en/of specialisten worden geraadpleegd. Tenslotte geeft hoofdstuk 4 informatie over het

testen van de gevonden oplossing.

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

- a. bedrijfsmatige beperkingen (beschikbaarheid van middelen en personeel);
- b. beperkingen uit de fabricageprocessen (thermische belasting, bewerkingsspanningen, kwetsbaarheid);
- c. geometrische beperkingen (hanteerbaarheid, bereikbaarheid);
- d. beperkingen door het karakter van het oppervlak (bewerkbaarheid);
- e. economische beperkingen (kostprijs, toegevoegde waarde).

Hier zullen problemen ontstaan. De definitie van bedrijfsmatige beperkingen zal van bedrijf tot bedrijf en van onderdeel tot onderdeel verschillen. Een gewenste methode van voorbereiding of aanbrengen kan bijvoorbeeld niet beschikbaar zijn. Het beschikbare proces kan een te grote warmte-inbreng hebben ('te heet' zijn) voor het basismateriaal. De geometrie is niet geschikt voor het proces, bijvoorbeeld het aanbrengen van een deklaag in een kleine boring. De gewenste oppervlakteruwheid is niet bereikbaar door de aanwezigheid van een grove structuur, of het proces en het materiaal zijn te duur.

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 vragen te stellen aan leveranciers, collega's, specialisten, enz. Bij het stellen van vragen wordt steeds 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, maar 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 faal-analyse 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 er 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. Hoofdstuk 7 gaat hier dieper op in.

2.1.3 Definities

Allereerst wordt getracht van de in deze voorlichtingspublicatie beschreven aantastingsvormen een definitie te geven. Corrosie is een verzamelnaam voor alle vormen van chemische aantasting, slijtage voor mechanische aantasting. Er zijn ook tussenvormen waarin het oppervlak tegelijk door chemische en mechanische oorzaken wordt beschadigd.

Voor corrosie is de definitie (o.a. volgens DIN 50900 en 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 nl. de atmosferische en de

procescorrosie. Deze vormen kunnen als volgt worden omschreven:

Atmosferische corrosie vindt plaats in een atmosfeer, bij temperaturen tussen -20 en $+70^{\circ}\text{C}$, 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.

Een definitie voor slijtage is volgens DIN 50320: **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 naar elkaar bewegende lichamen respectievelijk stoffen.

Uit bovenstaande definities volgt dat het in alle gevallen gaat om een ongewilde aantasting van een oppervlak en dat bij corrosie een chemische, en bij slijtage een mechanische oorzaak aan de aantasting te gronde ligt. Het is duidelijk dat bij het gelijktijdig optreden van beide oorzaken een versterking van de aantasting zal optreden.

Er zijn verschillende manieren om het oppervlak te verbeteren, bijvoorbeeld door het aanbrengen van een laag. In veel gevallen kan dit met *oplossen* of *opsputten*. Opsputten wordt ook vaak *thermisch spuiten* genoemd (Engels: thermal spraying). Net als bij het oplossen kent men verschillende processen met een aparte naam (zie hoofdstuk 5). De aangebrachte laag wordt *deklaag* genoemd, echter in het vakgebied spreekt men doorgaans over *oplossing* (oplossen), *coating* (oplossen en opsputten) of *(op)sputlaag (opsputten)*. Verwarrend is dat de aanduiding coating in andere vakgebieden ook voorkomt, bijvoorbeeld in de verftechniek. In deze publicatie wordt de term *deklaag* gebruikt.

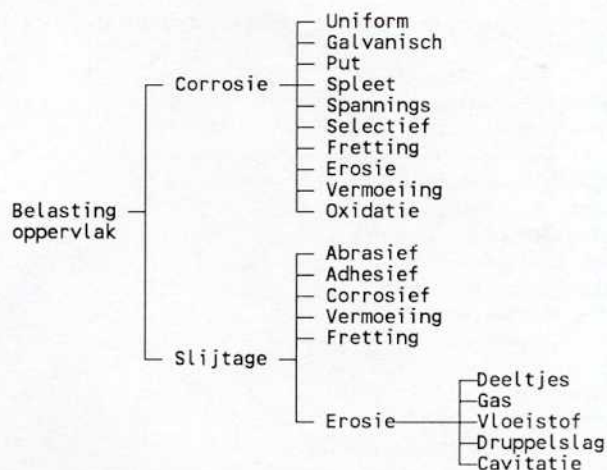
2.1.4 Wat gebeurt er aan het oppervlak?

De keuze van een deklaag wordt in eerste instantie bepaald door wat zich aan dat oppervlak afspeelt. Dit kunnen soms zeer complexe processen zijn, die zijn op te splitsen in een aantal standaardaspecten van oppervlakken waaraan eisen kunnen worden gesteld. De belangrijkste zijn:

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

In deze publicatie wordt alleen aandacht geschonken aan corrosie en slijtage (zie het schema in figuur 2.2).

Belastingvormen dienen zo goed mogelijk te worden omschreven. Waar mogelijk moet er naar worden gestreefd de belastingparameters te kwantificeren.



figuur 2.2 Schema van de te behandelen onderwerpen in deze publicatie

Bij corrosie is de omgeving van het oppervlak bepalend. De chemische samenstelling van het milieu waarin het oppervlak moet functioneren, 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.

2.1.5 Oppervlakteparameters

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

- 1) morfologie van het oppervlak
- 2) chemische samenstelling
- 3) microstructuur
- 4) mechanische eigenschappen
- 5) stabiliteit - chemisch
- fysisch

Bij de keuze van een deklaag is het belangrijk om het bestaande oppervlak te karakteriseren op bovenstaande parameters. Dit dient niet alleen om te onderzoeken of het bestaande oppervlak geschikt is voor de belasting aan het oppervlak. De karakterisering is ook nodig als uitgangspunt voor een eventuele oppervlakbehandeling.

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 vermoeingssterkte, rekgrens, breukrek en versterking 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 roestvast staal. Niet alleen vanwege de sterkte van dit materiaal in constructies, maar ook vanwege de benodigde 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 oppervlak en des te groter de weerstand tegen corrosie;
- *de chemische samenstelling*
Hoe meer 'edele' legeringselementen als chroom en nikkel, hoe beter de bestendigheid tegen aantasting. Legeringselementen zijn echter duur;
- *de microstructuur*
Een microstructuur die uit meerdere fasen bestaat heeft een negatief effect op de corrosiebestendigheid. Carbiden binden de legeringselementen en onttrekken ze daarmee aan de matrix. Carbiden kunnen onbedoeld worden gevormd door een verkeerde warmtebehandeling en daarmee de corrosievastheid verminderen. Ook de aanwezigheid van insluitsels kan de corrosiebestendigheid nadelig beïnvloeden;

De mechanische eigenschappen van het oppervlak zijn hier nauwelijks belangrijk.

Corrosie en slijtage

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

- *karakter van het oppervlak*
Een glad oppervlak is nu ongunstig. Ten behoeve van het smeermiddel is een bepaalde ruwheid of poreusheid gewenst. Vuil en slijtagedeeltjes zijn minder schadelijk wanneer ze in holten in het oppervlak worden ingevangen;
- *chemische samenstelling*
Om vastlassen van de ruwheidstoppen aan het tegenoppervlak te voorkomen, is het gewenst dat 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 zullen een gunstig effect hebben op de weerstand tegen slijtage van het oppervlak. Zij vormen harde eilanden in een zachtere ondergrond. Carbiden hebben een goede corrosieweerstand waaraan het bindermateriaal moet zijn aangepast. Nikkel is in dat opzicht gunstiger dan kobalt;
- *mechanische eigenschappen*
Bij voorkeur dient er een factor 2 verschil te zijn in de hardheid van de twee op elkaar werkende oppervlakken. De hardste zal daarbij het minst slijten. Tevens is het gunstig wanneer het oppervlak taai is en gemakkelijk verstevtigt.

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 er 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 slijtweerstand (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 verband met scheurinitiatie als gevolg van vermoeiing. Vooral m.b.t. de weerstand tegen vermoeiing is het ook 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 er gemakkelijk scheuren in het oppervlak ontstaan, die vervolgens doorgroeien in de ondergrond.

Slijtage

- *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 omtreksnelheid en de afstand tussen de bewegende oppervlakken. Hoe nauwer de spleet hoe 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 zullen een gunstig effect hebben op de weerstand tegen slijtage van het oppervlak. Zij vormen harde eilanden in een zachtere ondergrond;
- *mechanische eigenschappen*
Bij voorkeur dient er een factor 2 verschil te zijn in de hardheid van de twee op elkaar werkende oppervlakken. De hardste zal daarbij het minst slijten. Tevens is het gunstig wanneer het oppervlak taai is en gemakkelijk verstevtigt.

2.2 Industriële problemen

2.2.1 Bezwijkvormen

Schaden aan installaties zijn het gevolg van materiaal bezwijkmechanismen zoals:

1. Breuk door vermoeiing, brosbreken en lamellair tearing
2. Instabiliteitsproblemen, zoals bijvoorbeeld knik
3. Invloed temperatuur op de sterkte-eigenschappen, zoals bijvoorbeeld kruip
4. Corrosie
5. Slijtage

Op de laatste twee verschijnselen zal in deze publicatie verder worden ingegaan. De diverse verschijningsvormen worden gepresenteerd zoals in tabel 2.1.

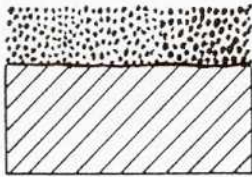
tabel 2.1 De diverse verschijningsvormen zoals die in deze publicatie wordt behandeld

Corrosie	Zuivere corrosievormen	
	Mengvormen	Corrosievermoeiing Fretting Erosie-corrosie
Slijtage	Zuivere slijtagevormen	
Combinaties waarin corrosie en slijtage elkaar bevorderen		

2.2.2 Overzicht corrosievormen

Algemene corrosie (figuur 2.3)

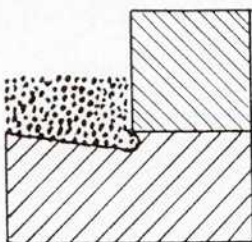
Wanneer de anodes en kathodes gelijkmatig over het oppervlak zijn verdeeld, zal het oppervlak vrijwel egaal worden aangetast (op de anodische plaats gaan metaalionen in oplossing en vindt dus de aantasting van het metaal plaats). Deze aantasting treedt op bij onbeschermd ongelegeerd staal.



figuur 2.3 Algemene corrosie

Galvanische corrosie (figuur 2.4)

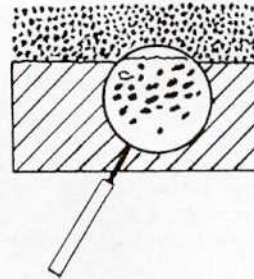
Bij deze corrosievorm zijn stroom-geleidende vloeistoffen aanwezig. De stroom vloeit door dit elektrolyt van de onedele positieve elektrode (anode) naar de edele negatieve elektrode (kathode). De anode gaat hierbij in oplossing of verandert chemisch.



figuur 2.4 Galvanische corrosie

Selectieve aantasting (figuur 2.5)

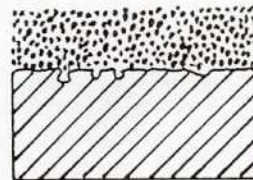
Selectieve aantasting is een preferente corrosie en verwijdering van één of meer elektrochemisch actieve elementen uit een legering. De minder actieve elementen blijven achter. Het meest sprekende voorbeeld van deze aantastingsvorm is ontzinking oftewel de selectieve verwijdering van zink uit messing.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



figuur 2.5 Selectieve aantasting

Putvormige corrosie (figuur 2.6)

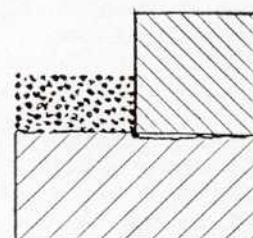
Wanneer de anode (bijvoorbeeld door beschadiging van de passieve film op roestvaststaal) erg klein is t.o.v. de kathode, zal de aantasting zich beperken tot enkele plaatsen. Door de concentratie van de corrosie op een klein oppervlak, zal de aantasting in dit geval vrij snel verlopen. Deze vorm van putvormige 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.



figuur 2.6 Putvormige corrosie

Spleetcorrosie (figuur 2.7)

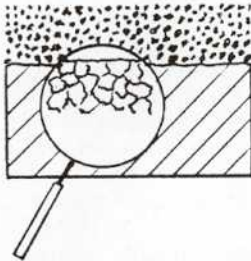
Hieronder verstaat men een plaatselijk versterkte corrosie in spleten. Het maakt hierbij niet uit hoe de spleet eruit ziet. Zowel spleten die ontstaan door contacten tussen lichamen als spleten in het lichaam zelf zijn gevaarlijk. Corrosie ontstaat door een verschil in zuurstofgehalte van het milieu in de spleet nabij het (buiten)oppervlak en dieper in de spleet.



figuur 2.7 Spleetcorrosie

Interkristallijne corrosie (figuur 2.8)

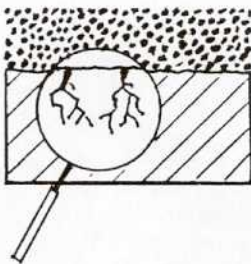
Bij deze corrosiesoort worden de kristalgrenzen preferent aangetast. Het meest bekend is dit verschijnsel bij roestvast staal, waarin chroomcarbiden zijn gevormd. Bij temperaturen tussen 600 en 800°C kunnen in bepaalde roestvaste staalsoorten chroomcarbiden (Cr_{23}C_6) worden gevormd. Deze carbiden scheiden zich voornamelijk op de korrelgrenzen af. 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 2.8 Interkristallijne corrosie

Spanningscorrosie (figuur 2.9)

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 2.9 Spanningscorrosie

Enige legering/milieu combinaties waarbij spanningscorrosie op kan treden zijn:

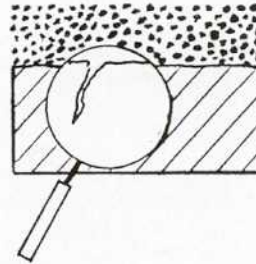
<i>Koolstofstaal</i>	<i>Hete nitraten, hydroxiden, H₂S.</i>
<i>Austenitisch RVS</i>	<i>Chloriden en halogenen.</i>
<i>Nikkellegeringen</i>	<i>Zuivere stoom onder hoge druk.</i>
<i>Messing</i>	<i>Ammoniak.</i>
<i>Aluminiumlegeringen</i>	<i>Chloriden, bromiden en fluoriden.</i>

2.2.3 Mengvormen

Dit zijn aantastingsvormen waarbij corrosie en slijtage tegelijk optreden. De mechanische belasting kan worden overgedragen door langs elkaar bewegende vlakken of door deeltjes die langs vlakken bewegen.

Corrosievermoeïing (figuur 2.10)

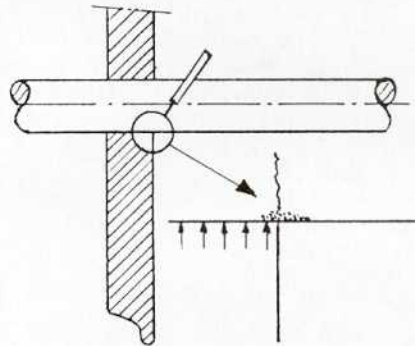
Hieronder verstaat men het versneld optreden van vermoeïing als gevolg van corrosie. Gewoon leidingwater kan dit al teweeg brengen.



figuur 2.10 Corrosievermoeïing

Fretting (figuur 2.11)

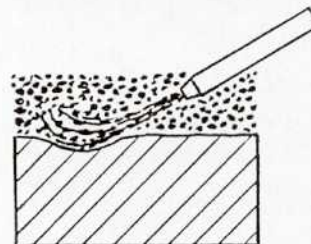
Deze aantastingsvorm wordt ook wel schavielslijtage genoemd of schavielcorrosie. Schavielen is een bekend verschijnsel bij vlaggenmasten waarbij het vlaggentouw zeer snel langs de mast zwiëpt. Dit verschijnsel treedt op in de techniek wanneer twee oppervlakken ten opzichte van elkaar een heen en weer 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 vermoeïingsscheuren te leiden. Kenmerkend is het poedervormige corrosieproduct.



figuur 2.11 Fretting

Erosie-corrosie (figuur 2.12)

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



figuur 2.12 Erosie-corrosie

2.2.4 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 als volgt:

- ▶ Abrasieve slijtage 50%
- ▶ Adhesieve slijtage 15%
- ▶ Erosieve slijtage 8%
- ▶ Fretting 8%
- ▶ Slijtage vermoeiing 5%
- ▶ Overige slijtage 14%

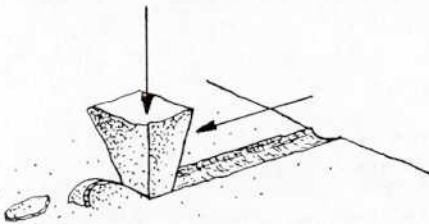
In de praktijk kan het gebeuren dat een bepaald slijtagetype op den duur overgaat in een ander type. Ook komt het voor dat twee typen gelijktijdig optreden. Daarbij kan corrosie ook nog een belangrijke rol spelen. Het behoeft geen betoog dat bij een dergelijke combinatie de schade aanzienlijk wordt vergroot.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

In het navolgende zullen de bovenvermelde slijtagevormen nader worden toegelicht.

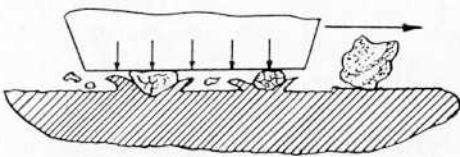
Abrasieve slijtage (figuur 2.13 en 2.14)

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). Smearing kan de slijtage verergeren, omdat het smeermiddel de slijtagegedeeltes 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 2.13 symboliseert de beschadiging door een hoge belasting, waarbij puntlasten deeltjes diep in het oppervlak drukken (Engels: high-stress abrasion). Figuur 2.14 geeft de beschadigingsvorm die bij lage belasting ontstaat als de belasting over een groot aantal deeltjes wordt verdeeld (Engels: low-stress abrasion).

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



figuur 2.13 Abrasieve slijtage (high-stress)

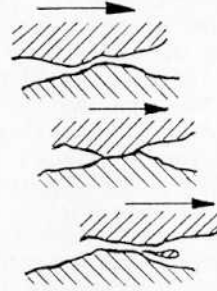


figuur 2.14 Abrasieve slijtage (low-stress)

Adhesieve slijtage (figuur 2.15)

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.

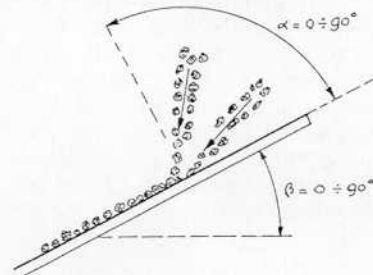


figuur 2.15 Adhesieve slijtage

Erosieve slijtage (figuur 2.16)

Onder erosieve slijtage verstaat men het materiaalverlies aan het oppervlak als gevolg van de inwerking van een stromende vloeistof of gas al dan niet met vaste deeltjes. Men kan de volgende vormen 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).



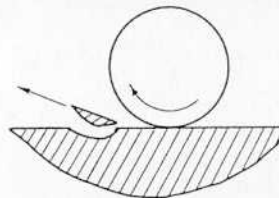
figuur 2.16 Erosieve slijtage

Slijtagevermoeiing (figuur 2.17)

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

Een aantal voorbeelden van deze slijtage is:

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



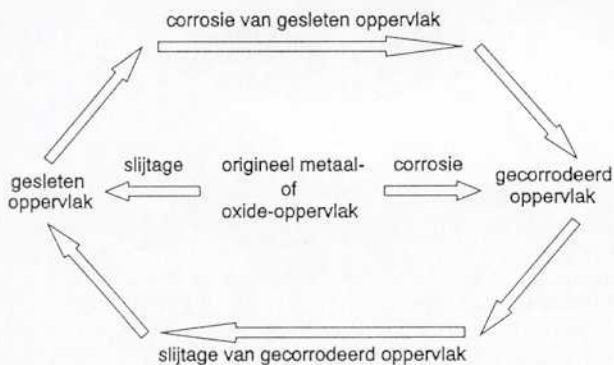
figuur 2.17 Slijtage vermoeiing

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 berekend worden met de theorie van Hertz.

2.2.5 Combinaties

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 2.18 aan elkaar gekoppeld. Indien een of beide aantastingstypen 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 materiaal verlies bij corrosieve slijtage hoog zijn.



figuur 2.18 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.

2.3 Mogelijke oplossingen voor slijtage- en corrosieproblemen

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 corrosie en/of slijtvaste 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 slijtvaste 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 2.2 een opsomming van veel toegepaste processen. Deze publicatie behandelt alleen het opspuiten en het oplassen. Onder het oplassen valt ook het explosief oplassen. Terwijl bij het mechanisch opbrengen door middel van plateren ook het aanbrengen van opgelaste slijtplaten valt.

2.4 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. Het overzicht in tabel 2.3 geeft aan waar bij thermisch spuiten verbeteringen te verwachten zijn.

Verder zijn zowel voor het oplassen als het thermische spuiten ontwikkelingen te verwachten in de stroombronnen en de regeling ervan. Men wil hiermee het volgende bereiken:

- ▶ hogere neersmeltsnelheid;
- ▶ minder opmenging;
- ▶ constante kwaliteit;
- ▶ hogere efficiency.

Men geeft vooral aandacht aan:

- ▶ elektroslak-bandlassen met hoge snelheidspoeders;
- ▶ speciale elektroslak-lasstroombronnen;
- ▶ bandlassen met een lange uitsteeklengte;
- ▶ pulsbooglassen, onder andere ook bij het onderpoederdeklassen, ter realisering van een constanter inbranding.

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 poeder dat van tevoren op het werkstuk is aangebracht of dat direct in de lichtbundel wordt 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). Daar komt bij dat door de hoge afkoelsnelheid amorfe structuren kunnen ontstaan waardoor de corrosiebestendigheid wordt verbeterd.

In de materialen sfeer zijn ontwikkelingen te verwachten in een uitbreiding van het aantal legeringen, voornamelijk door de ontwikkeling van gevulde draden en banden. Ook bij poeders ziet men 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.

tabel 2.2 Opsomming van veel toegepaste processen

oppervlaktelaag beïnvloeden		oppervlaktelaag opbrengen	
MECHANISCH		MECHANISCH	
kogelstralen rollen-walsen-kalibreren		plateren	
THERMISCH		THERMISCH	
oppervlakteharden	<ul style="list-style-type: none"> • inductief • vlam • laser/elektronenstraal • impuls • wrijving 	smelten	<ul style="list-style-type: none"> • oplassen • gietplateren • vertinnen • verzinken • emailleren
THERMOCHEMISCH		MECHANISCH-THERMISCH	
a. harden	<ul style="list-style-type: none"> • carboneren • carbonitreren 	a. opspuiten	<ul style="list-style-type: none"> • metalen • kunststoffen • harde stoffen
b. al dan niet harden	<ul style="list-style-type: none"> • boreren • chromeren • vanaderen 	b. plateren	<ul style="list-style-type: none"> • explosief • wals
c. niet harden	<ul style="list-style-type: none"> • nitreren • oxideren • sulfideren 		
FYSISCH			
a. in normale omgeving	<ul style="list-style-type: none"> • impregneren 		
b. in autoclaaf	<ul style="list-style-type: none"> • vacuümimpregneren 		
AFSCHEIDEN IN GASFASE		ELEKTROCHEMISCH	
CVD		a. kathodische afscheiding	<ul style="list-style-type: none"> • verchromen • vernikkelen • Ni-dispersie • vertinnen • verzinken
PVD			
diversen	<ul style="list-style-type: none"> • plasma nitreren • plasma etsen • ionen implantatie • plasma polymerisatie 	b. anodische afscheiding	
		CHEMISCH	
		a. stroomloos metaal afscheiden	<ul style="list-style-type: none"> • vernikkelen
		b. chemische reactielagen	<ul style="list-style-type: none"> • fosfateren
Deze publicatie behandelt alleen het opspuiten en het oplassen			

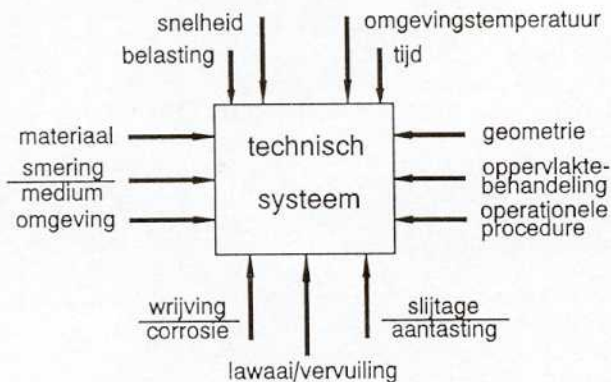
tabel 2.3 Overzicht

basistechnologie	innovatie	bedoeling
Plasmaspuiten	Omgeving: - inert gas - lage druk - onder water Inductieve koppeling Water stabilisatie	Minimum oxidatie Minimum poreusheid Amorfe structuren Homogeen smeltgedrag Hoge opbrengst
Vlamspuiten	Inert-gas verstuiving Spuiten onder gasbescherming Enkeldraadspuiten Gevulde-draadspuiten	Verminderde poreusheid Verwerking van reactieve materialen Opbrengst, efficiency Harde slijtlagen
HVOF	Verlengstukken HVAE ¹⁾ HVIF ²⁾ HPHVOF ³⁾	Minimum poreusheid Economie Dichte deklagen Betere hechting/dichtere lagen
Detonatie	Super D-Gun	Residuele drukspanningen Glad oppervlak
<p>1) High Velocity Air Fuel, lucht wordt gebruikt als verbrandingsgas en koelmedium. 2) Hypersonic Velocity Impact Fuel, alle bindingsenergie wordt geleverd door kinetische in plaats van thermische energie; moet leiden tot verbeterde dichtheid en minder ingevangen oxiden, speciaal bedoeld voor cermets. 3) High Pressure High Velocity Oxygen Fuel, door verhoging van de gasdruk worden een hoger kinetisch energieniveau bereikt.</p>		

Hoofdstuk 3

Mechanismen en technieken

Bekend is dat onder het begrip corrosie zeer veel verschillende aantastingsvormen 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 aantastingsvorm 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 bepalen. Het grote aantal beïnvloedbare parameters maakt het zoeken naar een oplossing complex, zoals figuur 3.1 laat zien. De afbeelding toont de vele variabelen, die bijdragen aan de eigenschappen van een technische 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 een "beter" materiaal te kiezen.



figuur 3.1 Systeem benadering 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 hoort men dan ook vaak opmerken 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 waarde 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 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.

3.1 Corrosie

3.1.1 Algemeen

In hoofdstuk 2.2 wordt een opsomming gegeven van de verschillende corrosievormen. In dit hoofdstuk wordt dieper ingegaan op de achterliggende mechanismen.

De corrosievastheid van een staalsoort wordt verbeterd door het toevoegen van chroom. Het chroomgehalte moet dan liggen tussen 12 en 30%. Legeringselementen zoals molybdeen en koper verhogen de corrosievastheid. Ferritische en austenitische roestvaste staalsoorten zijn alleen corrosievast wanneer ze in een oxiderend milieu worden toegepast, omdat dan een dichte en goed hechtende huid van chroomoxide wordt gevormd. Zijn dikke oxidehuiden aanwezig die bij hogere temperaturen zijn gevormd dan wordt het materiaal ter plaatse van deze oxidehuid gevoeliger voor corrosie. In zo'n geval zal de oxidehuid moeten worden verwijderd.

3.1.2 Spleetcorrosie

Spleetcorrosie is een plaatselijk versterkte corrosie in spleten, die in het corroderend 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 ($SI = \%Cr + 3,3\%Mo + 16\%N$). 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.

3.1.3 Putvormige corrosie

Putvormige corrosie (Engels: pitting) 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 RVS soorten minder gevoelig voor putvormige corrosie zijn. Hetzelfde geldt voor duplex staalsoorten. Dit kan worden uitgedrukt in een getal, de Pitting Index ($PI = \%Cr + 3,3\%Mo + 30\%N$) of Pitting Resistance Equivalent. Titaan gestabiliseerde RVS soorten zijn zeer gevoelig voor deze aantastingsvorm. Aangeraden wordt in plaats van AISI 321, AISI 347 (Nb gestabiliseerd) te gebruiken. Materialen met een hoge PI- of PRE-waarde verdienen de voorkeur (zie figuur 3.2). Zij hebben meestal ook een hogere weerstand tegen algemene aantasting, spleet- en spanningscorrosie.

3.1.4 Interkristallijne corrosie

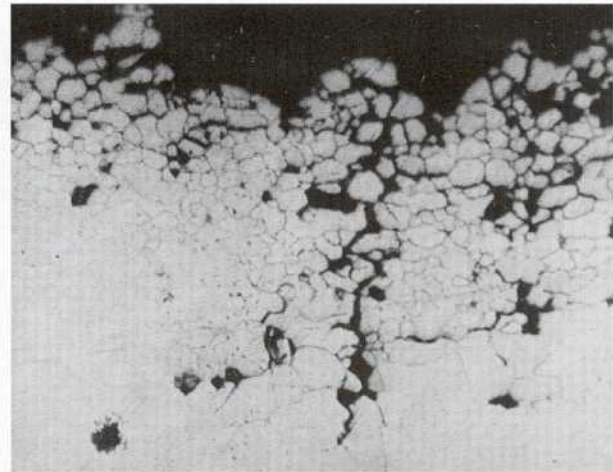
Door verhitting van roestvast staal tussen 450 en 850°C kunnen koolstof en chroom zich verbinden tot chroomcarbiden, die zich langs korrelgrenzen uitscheiden. De koolstofatomen verplaatsen zich in dit temperatuurgebied zeer gemakkelijk naar de korrelgrenzen. De diffusiesnelheid van chroom daarentegen 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 3.3).

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.

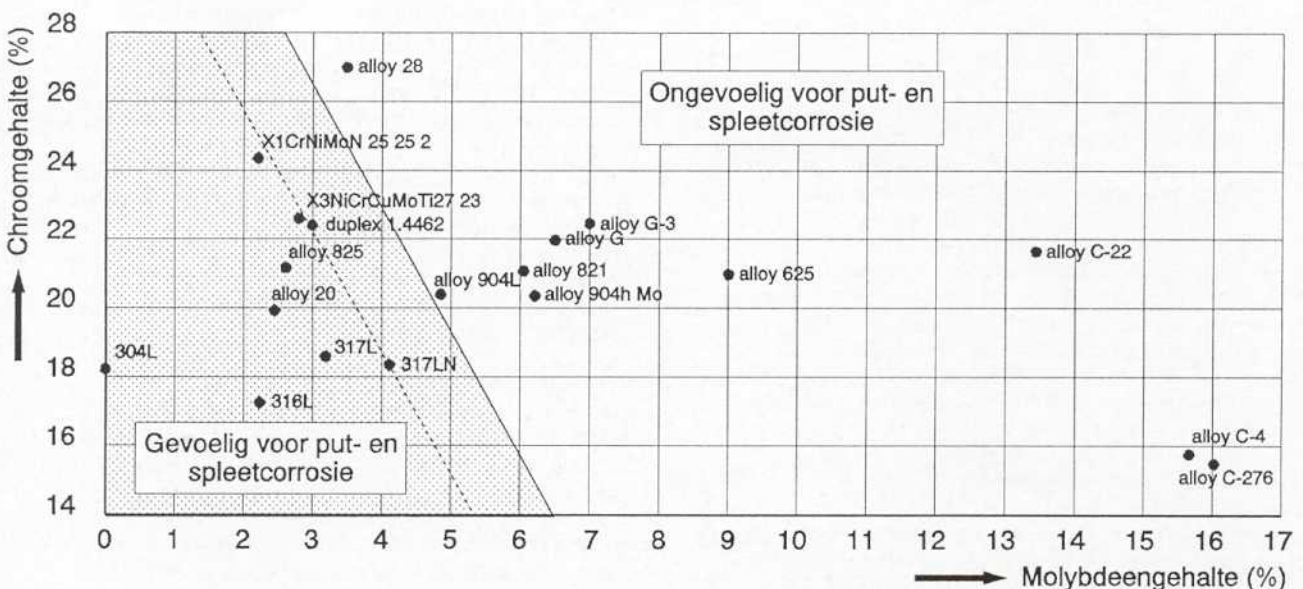


figuur 3.3 Interkristallijne corrosie

3.1.5 Spanningscorrosie

Trekspanningen van buitenaf opgelegd en restspanningen als gevolg van het lassen kunnen bij austenitische roestvaste 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 staal meestal transkristallijn verlopen. Een tweede kenmerk is dat de hoofdscheur aan het einde veel vertakkingen heeft (zie figuur 3.4).

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 roestvaste staalsoorten met een verhoogd nikkel- en/of molybdeengehalte toepassen. Ook kan worden overwogen duplex- of ferritisch roestvaststaal te gebruiken.



figuur 3.2 Relatieve weerstand tegen putvormige aantasting



figuur 3.4 Spanningscorrosiescheur

3.1.6 Hoge temperatuur corrosie

Wanneer roestvast staal in contact komt met hete gassen, zal een chemische reactie plaatsvinden tussen het hete gas en de legeringselementen in dat roestvaste 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

Wanneer staal wordt verhit in lucht, wordt een oxidehuid op het oppervlak gevormd. Indien het chroomgehalte van 0 tot 27% wordt verhoogd, 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 SO₂ voorkomen en in de vorm van H₂S 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 kruipsterkte 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 V₂O₅ uit stookolie en alkalimetaaloxiden zoals Na₂O.

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, zoals bijvoorbeeld bij lagere temperatuur staal niet oplost in kwik, gesmolten alkalimetalen of lood. Als nevenreactie treedt echter hier ook aantasting op, die zich op het grensvlak lucht/metaalsmelt concentreren. Niet altijd vindt de aantasting door een vloeibaar metaal aan het oppervlak plaats. Staan bijvoorbeeld (on)gelegeerde staalsoorten onder trekspanning en staan ze tevens blootgesteld aan een vloeibaar metaal dan kan een op spanningscorrosie lijkende aantasting optreden. Gesmolten tin en koper kunnen bijvoorbeeld langs de korrelgrenzen het staal binnendringen.

3.1.7 Corrosie-vermoeïing

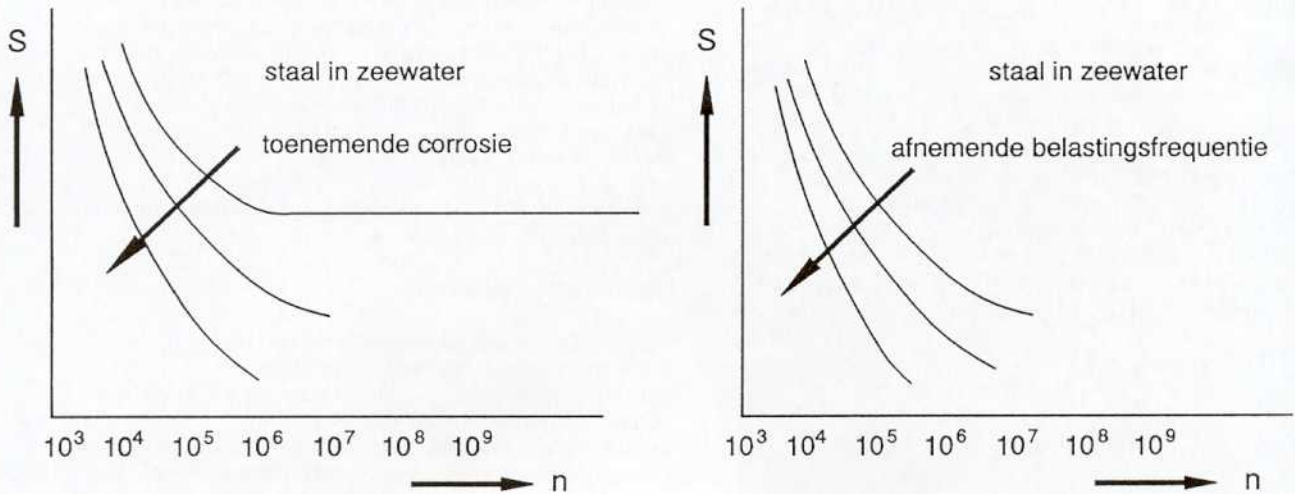
Het vermogen om wisselende belastingen op te nemen vermindert in aanwezigheid van een corrosief milieu. Een aangetast onderdeel zal meestal geen aantasting door algemene corrosie vertonen. Het mechanisme is nog niet duidelijk. Kathodische bescherming kan het probleem voorkomen, zodat het mechanisme voor een deel elektrochemisch van aard moet zijn. Naarmate de frequentie van de belasting afneemt neemt de weerstand tegen vermoeïing verder af (zie figuur 3.5).

3.2 Slijtage

3.2.1 Abrasieve slijtage

In hoofdstuk 2.2 wordt een opsomming gegeven van de verschillende slijtagevormen. In dit hoofdstuk 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 (zie ook figuur 3.1). Het belangrijkste mechanisme bij taai 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



figuur 3.5 Schematische invloed corrosie op vermoeiingssterkte: S = spanning en n = aantal spanningswisselingen

harding; een voortdurend ploegen introduceert vermoeiingseffecten. Al deze factoren dragen bij tot verwijdering van materiaal.

Bij brossere materialen is uitschilferen het dominante slijtagemechanisme. 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. Een en ander wordt tot uitdrukking gebracht door het volgende verband:

$$\Delta G = CL \times \frac{S}{H}$$

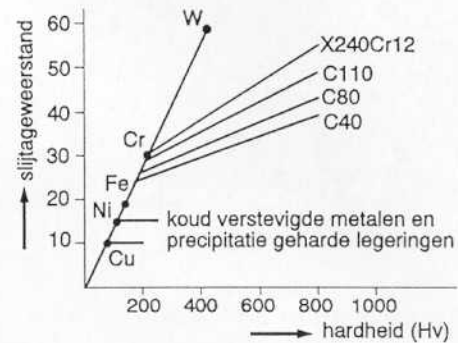
Hierin is: ΔG het gewichtsverlies van het materiaal, C een constante, L de druk op een abrasieve korrel, S de afgelegde weg van de abrasieve korrel en H de hardheid van het materiaal.

Door onderzoeken van Babičef en Chroěšof is, zoals figuur 3.6 aantoont, dit verband bevestigd voor metalen met hun natuurlijke hardheid. Uit de figuur blijkt tevens dat een hogere hardheid verkregen door een warmtebehandeling en in nog sterkere mate een hardheid verkregen door een koude vervorming of een hardheid, verkregen door een precipitatieharding, in belangrijke mate van het lineaire verband afwijken. Uit het voorgaande volgt, 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:

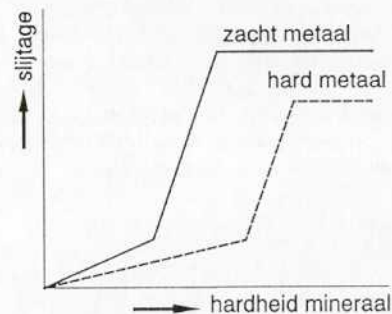
- ▶ hardheid abrasief;
- ▶ scherpte abrasief;
- ▶ trefhoek abrasief met het werkstuk.

Hardheid abrasief

Zoals reeds vermeld is het indringen van een abrasief materiaal in het oppervlak een factor, die de grootte van de slijtage bepaalt. Zoals uit figuur 3.7 blijkt, is de hardheid van een materiaal van zeer groot belang.



figuur 3.6 Verband tussen abrasieve slijtage bij verschillende metalen



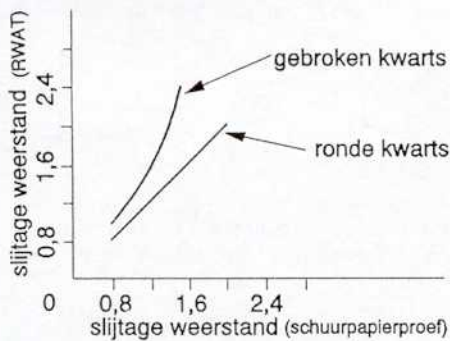
figuur 3.7 Slijtage als functie van de hardheid van een mineraal

Deze figuur, die voor het eerst door dr. Wahl werd 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 beitelje 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 laagje van een zeer hoge slijtage-waarde ontstaan. Er is dus een overgangsgebied dat sprongsgewijs verloopt. Dit verklaart het vaak geconstateerde grote verschil in slijtagegedrag bij overeenkomende, maar niet identieke condities.

Tabel 3.1 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 onmiddellijk 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 § 4.3.1) 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 3.8.



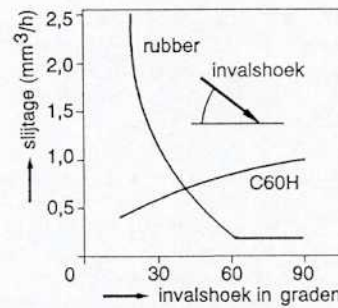
figuur 3.8 Invloed scherpste van het abrasief op de slijtage

Trefhoek van het abrasief met het werkstuk

De aard van de belasting is van grote invloed op de grootte van de slijtage. Figuur 3.9 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 C60, 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 de toepassing van rubber in beeld komt.

3.2.2 Adhesieve slijtage

Bij ductiele materialen, zoals metalen en kunststoffen, kan ook diffusie of korrelgroei optreden op de plaatsen waar door de hoge puntbelastingen



figuur 3.9 Abrasieve slijtage als functie van de invalshoek bij een hard en een elastisch materiaal

zogenaamde koude lasverbindingen worden gevormd. Hierdoor ontstaat een nog sterkere verbinding. Indien een 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. Indien echter de adhesiesterkte groter is dan de cohesiesterkte van de twee materialen, 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: Oxiden, chloriden, sulfiden, maar 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.

tabel 3.1 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

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.

3.2.3 Slijtagevermoeiing

Slijtagevermoeiing wordt, zoals reeds werd vermeld in hoofdstuk 2.2.4, veroorzaakt door wisselende schuifspanningen onder het oppervlak van een werktuigonderdeel. 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, bestaat er grote kans dat de gehele laag uitbreekt. Met behulp van de theorie van Hertz kan betrouwbaar de diepte en grootte van deze spanningen 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:

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

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

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:

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

Hierin is R de straal van de cilinder en I 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 2.10^7 omwentelingen nog geen putjes en/of afbladeringen 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:

1. Voorkom harde oppervlakte lagen, speciaal wanneer er een scherpe scheiding (geen diffusie) tussen laag en basismateriaal is.
2. Beperk insluitingen.
3. Voorkom harding.
4. Vermijd een grove structuur.
5. Voorkom brosheid, zoals bij keramiek of gietijzer.

Alle bovenvermelde factoren doen zich bij het oplassen voor in de overgangszone. Bij oppervlakte lagen 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!

Voorbeeld

Een ruwrijzer 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 $\mu = 0,27$.

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

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

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

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

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

$$\frac{1}{2\sqrt{\left(\frac{1}{500}\right)^2 + \left(\frac{1}{300}\right)^2 - \frac{2}{(500 \cdot 300)}}$$

$$\therefore B = 0,00673 \text{ mm}^{-1}$$

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

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

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

De halve assen van de contactellips zijn dan:

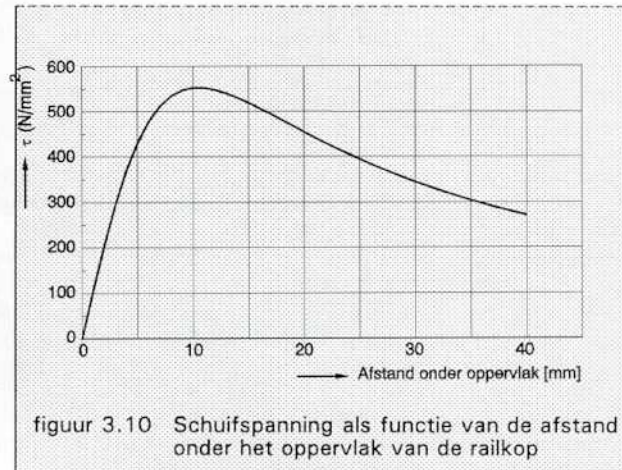
$$a = 1,19 \times 8,8 \text{ mm} = 10,47 \text{ mm}$$

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

De Hertze 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 3.10 geeft de verdeling van de schuifspanning onder het oppervlak van de railkop.



figuur 3.10 Schuifspanning als functie van de afstand onder het oppervlak van de railkop

3.2.4 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 het best bestreden worden door constructieve oplossingen, die de onderlinge bewegingen uitsluiten. Door de toegankelijkheid van het oppervlak te verminderen, door gebruik te maken van visceuze oliesoorten en in het bijzonder met een anti-oxidant of door MoS₂-deklagen, kan het ontstaan van fretting worden vertraagd.

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

3.2.5 Erosie

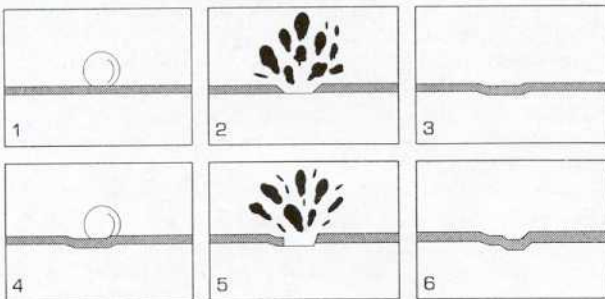
Door zijn vele verschijningsvormen is erosie moeilijk nauwkeurig te karakteriseren. De eigenschappen en de snelheid van het dragende medium en de deeltjes bepalen gezamenlijk het effect. De optredende slijtage is daardoor alleen goed te voorspellen als de praktijkcondities zo goed mogelijk worden nagebootst in testen. 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 erosie-vormen 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 verstevigingsgraad. RVS 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.

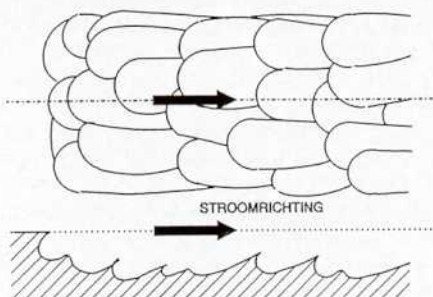
Een bijzondere vorm van erosie is cavitatie, waarbij de deeltjes worden gevormd door dampbellen in een vloeistof. De bellen ontstaan als de vloeistofdruk sterk varieert, waarbij de druk in bellen zelf zo laag kan worden dat ze in elkaar klappen. Dit veroorzaakt schokeffecten waarbij zeer hoge krachten vrijkomen. Door het herhaald effect kunnen grote stukken materiaal uit het oppervlak worden geslagen (zie figuur 3.11). Hoge vloeistofsnelheden en wervelingen stimuleren het optreden ervan. Materialen met een hoge weerstand tegen erosie-corrosie (zie § 3.2.5) 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 3.11 Schematisch verloop van het cavitatieproces

3.2.6 Erosie-corrosie

Erosie-corrosie (zie figuur 3.12) 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



figuur 3.12 Schematisch beeld erosie-corrosie

lijkt te hebben, is de kans groot dat het toepassen van een type 316 RVS, een onverwacht gunstig effect heeft, 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, doorgangsvernauwingen en pompwaaiers, waar dan ook veelvuldig corrosiebestendige legeringen worden gebruikt om slijtageproblemen te voorkomen.

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.

3.3 Aandachtspunten voor het aanbrengen van deklagen

3.3.1 Metaalkundige en aanverwante effecten bij basis- en deklaagmateriaal

Door het oplassen en opspuiten kunnen metallurgische veranderingen in het basismetaal en het zuivere toevoegmateriaal optreden. Verantwoordelijk hiervoor zijn de temperatuur en de opmenging. De eigenschappen van een staalsoort zullen vaak door een warmtebehandeling zijn verkregen. Als de temperatuur bij het oplassen of opspuiten in het materiaal gelijk is of hoger dan die van de warmtebehandeling, zullen de eigenschappen (veelal ten ongunste) wijzigen. 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.

Thermisch spuiten kan over het algemeen op iedere metalen ondergrond worden toegepast.

Thermoplastische kunststoffen kunnen bruikbare basismaterialen voor plasma en D-gun zijn. Er bestaat echter altijd een risico voor het oververhitten van de kunststof. Keramieken worden in de praktijk niet opgespoten, omdat ze al de eigenschappen bezitten die men met het opspuiten zou willen bereiken; het is echter mogelijk. Gietijzersoorten kunnen problemen opleveren, omdat het grafiet de binding negatief kan beïnvloeden. Bij automatenstaalsoorten heeft het hoge gehalte aan zwavel of lood eenzelfde bezwaar.

Een factor die de resultaten van opspuitprocessen beïnvloedt, is de hardheid van het basismateriaal. Stralen van het basismateriaal wordt voor het opspuiten toegepast om de hechting te bevorderen. Verder kunnen harde materialen problemen opleveren. Speciale tussenlagen kunnen worden gebruikt om dit probleem te overwinnen, maar het is wenselijk de hardheid van het basismateriaal beneden de $50 H_{RC}$ te houden.

Bij het oplassen zijn er twee overwegingen om een lasproces 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;
- ▶ dekragen op koperbasis kunnen worden toegepast op koper-, nikkel- en ijzerbasismaterialen;
- ▶ er zijn opspuitmaterialen die kunnen worden toegepast op aluminium, titaan, hittevasten metalen of metalen met een laag smeltpunt.

Koper heeft een slechte oplosbaarheid in ijzer. Booglassen kan tot scheurvorming leiden als gevolg van koperpenetratie.

Voor het tweede punt is, naast de afkoelsnelheid en het waterstofgehalte, het koolstofequivalent van het ongelegeerde of laaggelegeerde basismateriaal van groot belang. Gezamenlijk bepalen zij de gevoeligheid voor koudscheuren (thermische spanningen, waterstof en een gevoelige - hier harde - microstructuur). De meest gebruikte vorm van het koolstofequivalent is die, welke door het International Institute of Welding (IIW) wordt voorgeschreven en in EN 1011 is opgenomen:

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

Het geldigheidsgebied ligt tussen de koolstofequivalenten 0,35 en 0,70. In tabel 3.2 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 structuuromzettingen.

Austenitisch roestvast staal en austenitisch mangaanstaal worden **niet** voorwarmd.

tabel 3.2 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

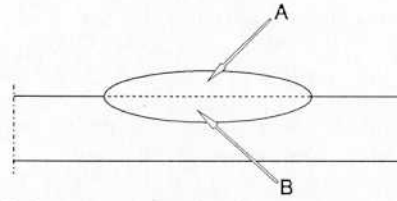
Opm.: Deze gegevens zijn op dit moment mogelijk conservatief. Raadpleeg uw staalleverancier

Opmenging

De eigenschappen van het zuivere toevoegmateriaal kunnen door de temperatuur worden beïnvloed, echter ook door de opmenging. Dit is de vermenging van het toevoegmateriaal met het basismateriaal.

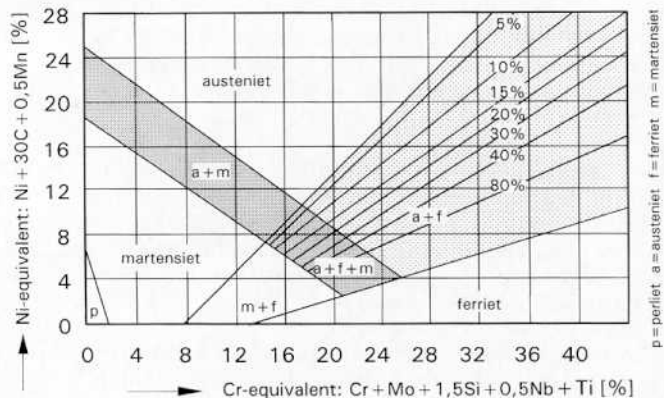
In tegenstelling tot opgespoten lagen die niet in het oppervlak zijn versmolten, zijn gelaste lagen met elkaar en met het basismateriaal versmolten. Ieder lasproces produceert dus zones waar het toevoegmateriaal vermengd wordt met het basismateriaal. Dit effect wordt opmenging genoemd. De grootte van de opmenging is afhankelijk van het lasproces en wordt omschreven door de formule (zie ook figuur 3.13 en tabel 5.1):

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



figuur 3.13 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 zeer hoge mate de corrosie- en slijtvaste eigenschappen van de lagen. Om een bepaalde samenstelling in de eerste laag te krijgen zal men dus uit moeten gaan van een hoger gelegeerd toevoegmateriaal. Bij RVS kan het effect van de opmenging op de microstructuur van de deklaag worden voorspeld met het zogenaamde Schaefflerdiagram (zie figuur 3.14). Hierin zijn de structuurbestanddelen aangegeven als functie van het nikkel- en het chroomequivalent. De voorspelling is redelijk betrouwbaar. Opmenging speelt vooral bij oplossen. Bij opspuiten is hier nauwelijks of geen sprake van. Bovendien 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 3.14 Schaefflerdiagram met temperatuurinvloedsgebieden

Thermische spanningen

Een volgende 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, krimpcheuren 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 in zachte toestand zijn vóór het oplossen; voor het opspuiten is dit minder van belang. 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 verspaning heeft ondergaan, moeten worden spanningsarmgegloeid voor de eindbewerking van het werkstuk. Dit moet zeker gebeuren wanneer vervormingen tot een minimum beperkt dienen te blijven. Bij insmelt(opspuit)legeringen ligt de procestemperatuur boven de 1000°C om een metallurgische hechting te bereiken. Het zal duidelijk zijn dat bij dergelijke procestemperaturen niets van de warmtebehandelingsstoestand van het basismateriaal overblijft. Dit zal men moeten accepteren, anders is aansluitend een warmtebehandeling nodig om de eigenschappen te herstellen.

De noodzaak van voorwarmen

Door het temperatuurverschil zullen restspanningen in het onderdeel achterblijven. Door het voorwarmen wordt de rekgrens verlaagd en kunnen de spanningen zich gemakkelijker verdelen. Dit leidt meestal tot lagere restspanningen. Het gevolg is minder kans op krimpscheuren in de deklaag en ook de vervormingen zullen minder zijn.

Is het basismateriaal staal, dan kan in de warmtebeïnvloede zone (WBZ) harding optreden. Dit kan leiden tot scheuren in de deklaag en in het geval van lassen ook onder deze laag in de WBZ. Dit laatste kan het uitbrokkelen van de deklaag tot gevolg hebben. Door de werkstuktemperatuur tijdens het opbrengen van de deklaag tussen een vastgesteld minimum en maximum te handhaven, worden bovengenoemde problemen voorkomen. Dit noemt men de tussenlaag- of interpasstemperatuur. Afhankelijk van de transformatiekaracteristieken van het staal, kan het voldoende zijn de WBZ naar een zachte structuur te laten transformeren. Echter een veilige voorzorgsmaatregel is om onmiddellijk na het opbrengen een warmtebehandeling toe te passen.

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

1. Het oppervlak van het werkstuk oxideert voor het neer te smelten metaal uit, waardoor het risico van bindingsfouten en poreusheid ontstaat. De limiet voor een laaggelegeerd staal ligt bij 400°C en voor een hittevast materiaal bij 600°C.
2. 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 en 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 net niet tot smelten wordt gebracht. Voor grote werkstukken zal ondersteuning door aparte branders nodig zijn.

Controle van de tussenlaagtemperatuur

De minimum en maximum temperatuur waartussen veilig kan worden opgelast is in het voorgaande punt

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, of dat het op een koeler gedeelte van het werkstuk zal moeten worden voortgezet indien dit mogelijk is. Dit zal zich vooral voordoen bij oplassen. Bij opspuiten zal men door positioneren van de beschermgasstroom, zonodig door plaatsing van extra gasmonden, de temperatuur trachten te beheersen. Ook het bijplaatsen van persluchtmonden op het reeds gestolde materiaal is mogelijk. Ook het omgekeerde kan nodig zijn. 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. Specialistische adviezen kunnen bij de leveranciers van toevoegmaterialen worden ingewonnen.

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:

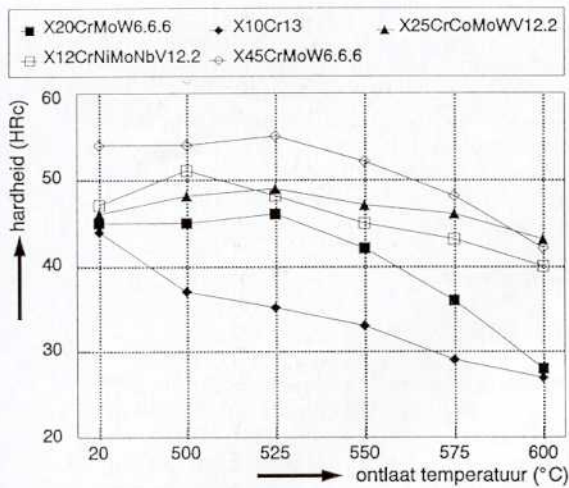
- ▶ temperatuuregalisatie op de procesinrichting, gevolgd door een langzame afkoeling in een isolatiepoeder of -deken;
- ▶ temperatuuregalisatie, gevolgd door een onmiddellijke overbrenging naar een oven, voorgewarmd op de minimum tussenlaagtemperatuur. De opvolgende temperatuurcyclus kan dan verschillende 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 isothermische of continue afkoeltransformatiediagrammen van het basismateriaal raadplegen.

Latere warmtebehandelingen

Werkstukken, die afgekoeld zijn in bijvoorbeeld een isolerend poeder zullen meer restspanningen bezitten, dan die een 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 oplasmaterialen sterk ontlaten (zie figuur 3.15).

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.



figuur 3.15 Hardheid als functie van de ontlaattemperatuur

Als een thermisch gespoten laag moet worden ingesmolten, kan in veel gevallen de microstructuur worden hersteld door het opgebrachte materiaal opnieuw te veredelen. Hierbij moet op een aantal dingen worden gelet:

- ▶ de thermische uitzetting van de deklaag moet zo goed mogelijk zijn afgestemd op die van het basismateriaal;
- ▶ de opwarming en afkoeling mag niet te snel verlopen. Hoe groter het verschil in uitzetting, hoe lager de snelheden;
- ▶ de restspanningen moeten zo homogeen mogelijk verdeeld zijn. Producten met een complexe geometrie moeten daarom zeer langzaam worden opgewarmd en afgekoeld (max. 30°C/h).

Speciale aandachtspunten

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 nikkel-chroom-staalsoorten zijn gevoelig voor ontlaatsbroosheid of voor een reductie van de taai-bros-overgangstemperatuur. Sommige hooggelegeerde roestvaste staalsoorten kunnen de brose sigma-fase vormen. 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 geen goedkoper basismateriaal met een aanzienlijk minder storend thermisch gedrag (bijvoorbeeld betere lasbaarheid) gebruikt kan worden. Bij het oplossen 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 oploslegering;
- ▶ bewerkingseigenschappen;
- ▶ bevat gemakkelijk oxiderende elementen, zoals aluminium of koper;
- ▶ het materiaal is hard en bros;
- ▶ een niet-gestabiliseerd RVS;
- ▶ het staal bevat veel stikstof of silicium.

Bij het opspuiten moet eerst onderscheid worden gemaakt naar het type deklaag: insmeltlegering, cermet of keramiek. Voor insmelten probeert men bij

voorkeur de bij lassen opgegeven regels te volgen. Cermets en keramische materialen zal men zo koud mogelijk opbrengen, zodat uitzetting en structuur-omzettingen hier niet zo'n grote rol spelen. Martensitisch RVS is slecht of niet in te smelten.

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 oplossen - 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 brose 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; oplossen wordt niet aanbevolen. Opspuiten is daarentegen toepasbaar.

Ni-hard

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 oplossen 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 deklaag neergesmolten 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 oplosbare ondergrond te verkrijgen;
- ▶ de dikte van dure deklaagmaterialen te beperken.

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

1. Harde deklagen op een zacht materiaal bij hoge belastingen. Wanneer een harde oploslegering wordt gebruikt op een zacht basismateriaal bestaat de kans dat de harde laag kapot gaat, omdat de zachte ondergrond wordt ingedrukt onder deze hoge belasting. Onder extreme omstandigheden kan dit uitschalen van de oploslaag tot gevolg hebben. Om dit te voorkomen wordt een laag van een sterk en taai materiaal op het werkstuk onder de harde deklaag aangebracht.
2. Wanneer het verschil in thermische uitzetting tussen deklaag en basismateriaal groot is en de oppervlaktehardheid groter is dan 50 H_{RC}, 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. Als bufferlaag kan dit ook een laag zijn met een vergelijkbare samenstelling en een lagere hardheid (tussen 25 en 30 H_{Rc}). Hiermee worden scheuren in de harde toplaag voorkomen.

3. Wanneer het ontwerp uitgaat van een relatief dikke deklaag, kan de volledige dikte, opgebouwd met alternatieve lagen, economisch zijn. In boogglasprocessen zal de natuurlijke opmenging met het basismateriaal zorgen voor de benodigde gradatie in eigenschappen. Bij het spuiten kan men door te werken met twee draden of meerdere poederhoppers, de op elkaar aangebrachte zeer dunne lagen achtereenvolgens met kleine stappen van samenstelling laten veranderen.
4. Wanneer een onderdeel is blootgesteld aan zware stoten of buigen, bestaat het risico dat in de neersmelt, 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 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. Deze oplossing kan ook werken bij thermisch gespoten lagen, mits de hechtsterkte voldoende is.
5. 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).

3.3.2 Invloed van defecten op de deklaag

De aanwezigheid van defecten in het basismateriaal beïnvloedt de kwaliteit van de deklaag. Veel deklagen 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 defecten 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 terecht komen en daar (vrij grove) defecten veroorzaken. Een zorgvuldig onderzoek is dus nodig, zowel voor 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 oplassen gebruikt men lasmetaal met ongeveer dezelfde samenstelling als het basismateriaal. Voor het spuiten zijn diverse reparatiematerialen beschikbaar. Omdat hier geen omsmelten van het basismateriaal plaatsvindt, is de samenstelling minder kritisch dan het vermogen om dikke lagen op te bouwen. Reparatiematerialen zijn daarom altijd ductiele materialen die geen hoge restspanningen opbouwen.

3.3.3 Scheuren

Koudscheuren

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

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

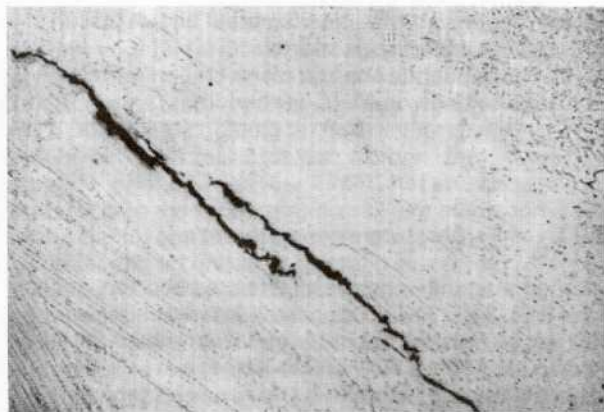
Dit type scheur is bij het opspuiten niet bekend.

Warmscheuren

Warmscheuren worden gevormd bij hoge temperatuur (meestal hoger dan de helft van de smelttemperatuur) 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 3.16).



figuur 3.16 Stollingsscheur in type 347 lasmetaal

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

In austenitische RVS soorten moet, om stollings-

scheuren 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 volume percentage 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 telraster.
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 oplassen wordt vaak een overlap tussen de verschillende lasrupsen van meer dan 50% toegepast, de warmscheuren worden dan omgesmolten. Bij het lassen van roestvast staal is een 100% austeniet structuur zeer gevoelig voor warmscheuren. Enkele procenten δ -ferriet in de matrix heft dit probleem op.

Krimpscheuren

Krimpscheuren zijn gewoonlijk met het blote oog waarneembaar en behoeven niet het functioneren van het werkstuk negatief te beïnvloeden. Bij de hardere oplas- 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 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, bijvoorbeeld 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 dient men gedurende de opslagperiode het oppervlak te conserveren 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.

3.3.4 Poreusheid

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 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 uitermate groot belang ook van tevoren vast te stellen hoe de beoordeling zal plaatsvinden.

3.3.5 Insluitingen

Wat voor poreusheid geldt, geldt ook voor de insluitingen.

Hoofdstuk 4

Beproevingen

4.1 Functie van testen

Beproevingen kunnen zowel aan het basismateriaal plaatsvinden als aan de lastoevoegmaterialen of de opspuitmaterialen. Ook zal men van de aangebrachte laag moeten bepalen of aan de eisen, gesteld aan de eigenschappen, wordt voldaan. De beproevingen van het basismateriaal (trekproef, diverse hardheidsmetingen, enz.) zijn algemeen bekend en behoeven in deze publicatie geen nadere uitleg. Het testen van de toevoegmaterialen voor oplossen respectievelijk opspuiten zal veelal worden gedaan door de fabrikant. Het bedrijf dat de laag aanbrengt, maar soms ook de eindgebruiker, kan verlangen de resultaten te documenteren, door bijvoorbeeld een certificaat bij de levering te eisen. Een andere invalshoek is het onderling vergelijken. De oppervlaktegesteldheid vòòr 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 voorbewerking van de ondergrond als de toevoegmaterialen aan bepaalde kwaliteitseisen moeten voldoen om een deklaag met de gewenste eigenschappen te krijgen. Ook hierop kunnen testen worden gericht. In het algemeen kunnen testen dus worden gebruikt zoals in tabel 4.1 vermeld.

tabel 4.1 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

Het testen vervult alleen een functie voor de aangekruiste velden. Deze worden hieronder nader toegelicht.

4.1.1 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 deklaag-systeem in de test worden aangesproken. Juist vanwege het systeemkarakter moet goed worden nagedacht over alle elementen van figuur 3.1 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.

Ook 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 voorbewerking(en).

Toevoegmaterialen en beschermgassen

Dit is doorgaans het gebied van de materiaal-leverancier. Leveranciers zijn zeer zorgvuldig voor een product op de markt wordt gebracht. Voor zowel de uitvoerder als de eindgebruiker is het vaak goed te weten dat de leverancier in zijn laboratoria vaak 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 3.1.

4.1.2 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 deklagen te vergelijken op weerstand tegen abrasie als de hardheid van het testmedium (bijvoorbeeld aluminiumoxide grit) 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 zoutspoeitest, deze wel kan worden gebruikt voor andere milieu's, mits de hoofdcomponenten aanwezig zijn. Zo is het goed mogelijk deze test te gebruiken voor alle milieu's 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 porositeit naar de ondergrond oplevert.

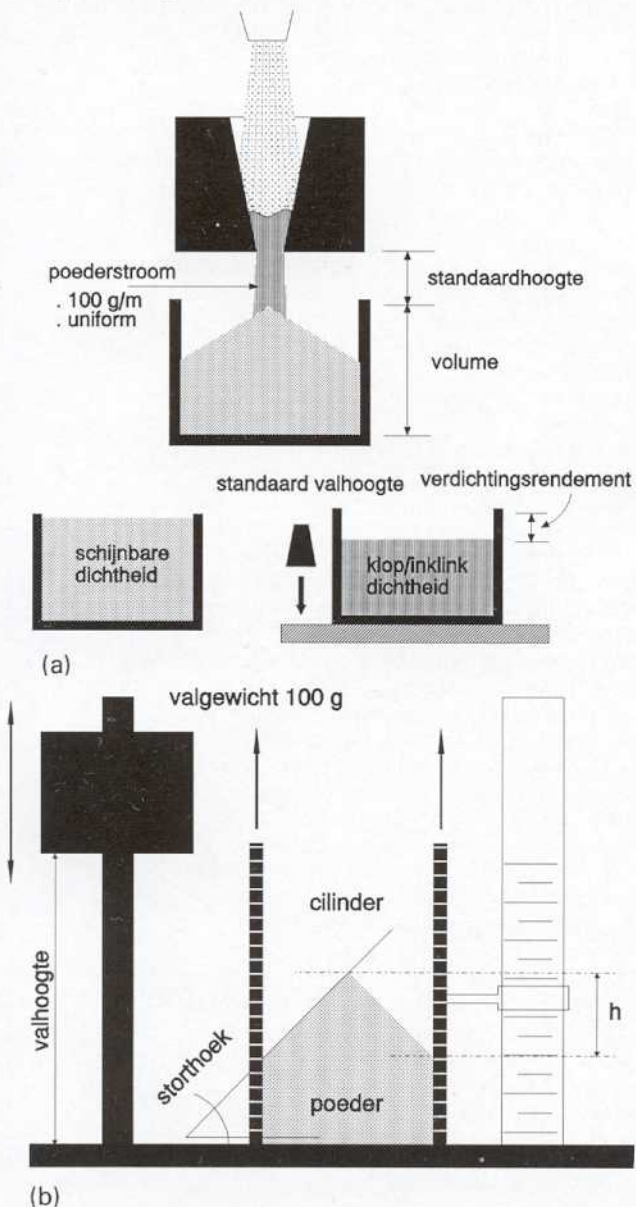
De niet aangekruiste velden zijn alleen van belang als de functionele eigenschappen in detail bekend zijn. Rangschikking op basis van benadering is te riskant.

4.1.3 Kwaliteitsborging

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 heeft 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 *voorbewerking ondergrond* met een simpele waterdruppel nagaan of het oppervlak voldoende schoon is. Voor de *toevoegmaterialen en dragergassen* kan bijvoorbeeld met een vast ingesteld proces gekeken worden of een spuitpoeder 'normaal loopt' (zie figuur 4.1 a en b).



figuur 4.1 Testen van poeder (a) loopgedrag volgens Hall, (b) storchoek

Om een *deklaag* te bekijken kan bijvoorbeeld een proefplaatje worden gespoot en gebogen, waarbij minimaal een bepaalde hoek gehaald moet kunnen worden voor de deklaag scheurt of er af springt. 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 deklaag-gedrag 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.

4.2 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:

1. Lange beproevings tijden (maanden tot jaren).
2. Voor de opzet en het volgen van deze proeven is deskundig personeel noodzakelijk, dat het productiepersoneel 'voor de voeten kan lopen',
3. Tijdens de lange beproevingsduur kunnen in het milieu of het belastingspectrum wijzigingen optreden.
4. 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 (figuur 3.1). Voor een kritische toepassing zal het daarom nodig zijn de initiële eenvoudige proeven te laten opvolgen door realistischere testen. In stappen wordt daarbij het technische systeem dichter bij 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, vaak een te groot waarheidsgehalte 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. Herverdeling 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

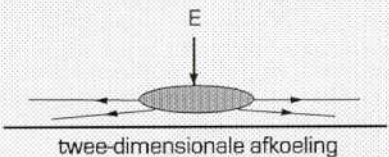
een grote doorsnede kan de ondergrond de warmte zo snel afvoeren dat hierin hardingseffecten kunnen optreden, of poreusheid kan ontstaan. De veranderingen in de warmtestromen en spanningen kunnen sprongsgewijs verlopen, bijvoorbeeld als de warmtestroom overgaat van 2-dimensionaal (dun plat proefstuk) naar 3-dimensionaal (zie kader). Een holle geometrie heeft ook een heel andere warmtehuishouding dan een massieve. Belangrijk is vooral te letten op verhoudingen.

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.

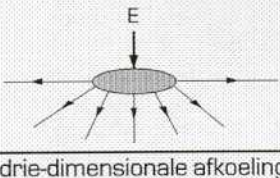
De afkoeltijd tussen 800° en 500°C (" $t_{g/5}$ ");

a. Voor een twee-dimensionale afkoeling geldt:



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

b. Voor een drie-dimensionale afkoeling wordt dit:



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

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:

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

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

In het voorgaande is:

- $t_{g/5}$ = afkoeltijd van 800° naar 500°C in s
- t = materiaaldikte in cm
- E = warmte-inbreng = UI/v in J/cm
- U = boogspanning in V
- I = stroomsterkte in A
- v = voortloopsnelheid in cm/s
- t_t = overgangsdikte (2-dimensionaal naar 3-dim.)
- T_0 = voorwarm- (of omgevings)temperatuur in °C
- c = soortelijke warmte in J/g
- ρ = dichtheid in g/cm³
- λ = warmtegeleidingscoëfficiënt in W/cmK

waar men bezig is aan de verwachtingen voldoet. Dat wil zeggen dat men van tevoren moet nadenken over het mogelijke resultaat. 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 corrosie-onderzoek is dit vaak de enige mogelijkheid bij een moeilijk voorspelbaar of fluctuerend procesmilieu.

DIN 50322 geeft zes beproevingscategoriën voor een testtraject met stapsgewijze verschillen in schaal-grootte. Deze zijn hieronder weergegeven.

1. *Bedrijfsproeven met complete installaties.*
(Bijvoorbeeld een treinstel met opgelaste assen of opgespoten 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 tandwiel kast 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. Paragraaf 4.3.5 geeft ook informatie over de functie van proeven. Tabel 4.2 geeft het verband aan.

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

4.3 Testaspecten

In paragraaf 2.1 zijn oppervlakte-eigenschappen en eisen besproken. Tezamen met de mogelijke

De kern van een goed testtraject is, dat men de volgende, realistischer testfase pas ingaat, als de test

tabel 4.2 Relaties tussen testen

Type test	Volgens § 4.3.5							
DIN 50322	Ontwikkeling	Prototype	Betrouwbaarheid	Bedrijfscondities	Kwalificatie	Afname koopdelen	Productie	Storingsanalyse
Praktijk		X	X	X			X	X
Proefstand	X	X	X					X
Onderdeel	X		(X)		X			
Vormstuk	X		(X)			X	X	
Proefstuk	X		X		X	X		
Testcoupon	X		X			X		

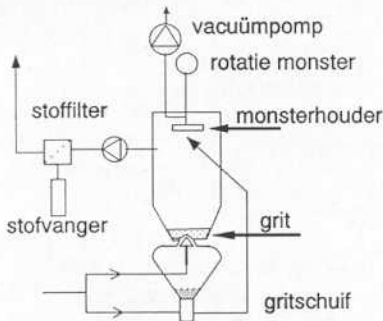
degradatiefenomenen uit hoofdstuk 3 kunnen nu testcondities worden ontwikkeld. Door hieraan ook prioriteiten toe te kennen, te baseren op de functie van de test en de toepassing van de deklaag, kunnen testen worden gekozen. In deze paragraaf worden standaardtesten, waarvan een deel ook reeds in normen is vastgelegd en enkele belangrijke niet gestandaardiseerde proeven, kort beschreven.

4.3.1 Standaard slijtagetesten

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

Straalslijtage beproeving

In figuur 4.2 is deze beproevingsmethode schematisch weergegeven. De straalesslijtagewaarden worden bepaald door het gewichtsverlies tussen voor 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. De proef wordt beschreven in DIN 50332.



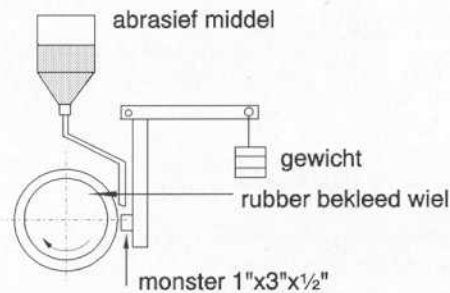
figuur 4.2 Schema straalesslijtage apparaat

Rubber Wheel Abrasion Test (RWAT)

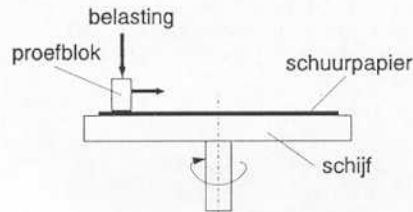
Het principe van deze testmethode is in figuur 4.3 weergegeven. Deze proef staat beschreven in ASTM G65-91. Het abrasieve materiaal is in de meeste gevallen kwartszand. De gevonden slijtagewaarden worden uitgedrukt in procenten van de referentieslijtagewaarden, gevonden voor S 235 (St. 37).

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 4.4). Er bestaan verschillende testapparaten en bewegingspatronen,



figuur 4.3 Schema RWAT-apparaat

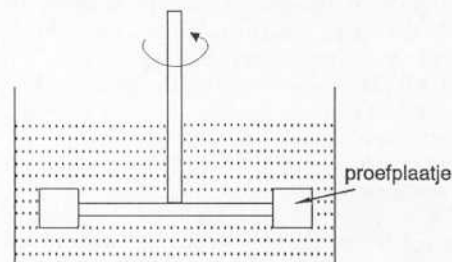


figuur 4.4 Schema schuurpapierproef

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).

Slurry-proef

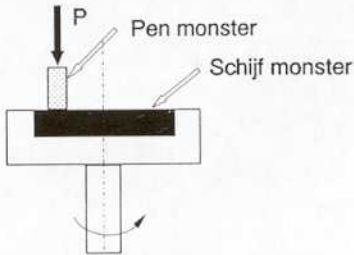
Bij het transport van zand-water-mengsels staan pompen en leidingen, enz. bloot aan erosie door dit mengsel. Door twee of meer proefplaatjes in een bak door een dergelijk mengsel te laten bewegen wordt deze slijtagevorm gesimuleerd (zie figuur 4.5). De test staat beschreven in ASTM G-75. Het resultaat wordt uitgedrukt als een gewichtsverlies per tijdseenheid (g/h).



figuur 4.5 Schema slurry-proef

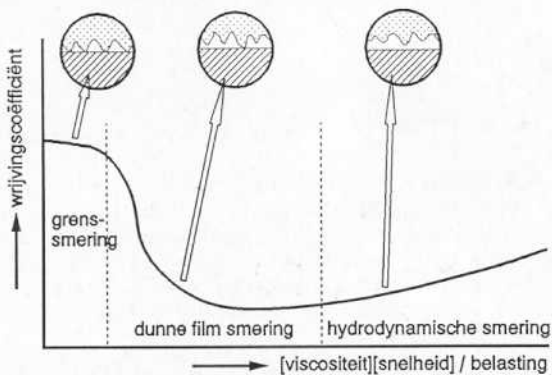
Pin on disc

Dit is een algemeen toepasbare testopstelling voor adhesieve slijtage (zie figuur 4.6). 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 4.6 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 4.7). Omdat veel parameters zijn te variëren en tegenwoordig de gegevensverwerking per computer gebeurt, maakt dit de test tot een van de meest veelzijdige.



figuur 4.7 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.

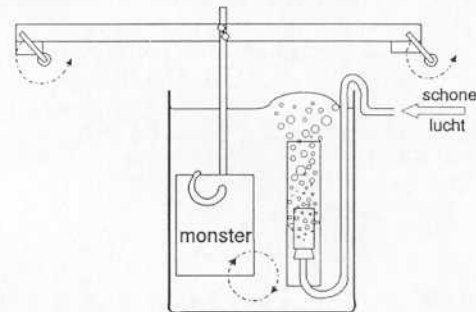
De test is beschreven in ASTM G 99 (pin on disk) en ASTM G 77 (block on ring).

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

In de test zijn alle tribo-parameters te onderzoeken en te vertalen naar praktische condities. Het meest toegepast wordt het bestuderen van de ontwikkeling van de wrijvingscoëfficiënt in de tijd en het meten van de slijtfactor k .

4.3.2 Standaard corrosietesten

Voor het corrosie-onderzoek bij deklagen vormt de mogelijke aanwezigheid van fouten 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 fouten 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 4.8 geeft een voorbeeld van een opstelling waarbij het monster in een rondgaande beweging wordt gebracht. De resultaten van immersietest worden weergegeven als een gewichtsverlies per tijdseenheid of het aantal indicaties per oppervlakte-eenheid.

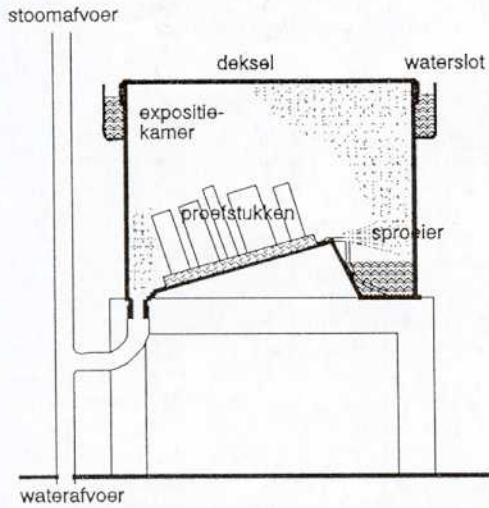


figuur 4.8 Voorbeeld immersietest

Zoutsproeitest

Een meer geavanceerde test is de zoutsproeitest zoals deze in ASTM B117 (standaarduitvoering), ASTM B287 en DIN 50021 (zure test) en ASTM G85 (overige zoute milieu's) zijn beschreven (zie figuur 4.9). Bij de test wordt het materiaal blootgesteld aan een warme zoutnevel. De vernevelde zoutoplossing kan agressiever worden gemaakt door toevoegen van zuur. Goede deklagen, gebaseerd op austenitisch RVS, superlegeringen of keramiek, moeten een blootstelling van 1000 uur aan de zure zoutsproeitest gemakkelijk kunnen doorstaan. Heeft men enige ervaring in het gedrag van deklagen, 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. Als de aantasting langs de korrelgrenzen het basismateriaal bereikt, neemt de stroomdichtheid plotseling toe en zal de potentiaal verschuiven.

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.



figuur 4.9 Zoutsproei-test

Ferroxyyltest

Een snelle indicatie van tot op het basismateriaal doorlopende porositeit of scheuren is mogelijk met de ferroxyyltest. 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 RVS oppervlakken. Met de ferroxyyltest wordt dan ijzercontaminatie aangetoond. NEN 2170 is bedoeld voor het controleren van galvanische nikkel- en nikkelchromolagen. NEN 2170 is summier in het geven van randvoorwaarden voor de omgeving, die echter nogal streng zijn. De waarschuwing dat ijzerhoudend stof 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. De testvloeistof moet bij voorkeur met een niet-ijzerhoudende spuit worden opgebracht. Op een RVS oppervlak 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 porositeit suggereren. De ferroxyyltest 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.

4.3.3 Niet gestandaardiseerde beproevingsmethoden

De waarde van niet gestandaardiseerde methoden is bij deklagen 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 corrosie-opstellingen. 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 corrosie-opstellingen kan een veelheid aan monstervormen, 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 redelijk gelijke 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.

4.3.4 Praktijkbeproeving

Een nauwkeurige voorspelling van de prestatie van veel opslagen 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 zullen vaak noodzakelijk zijn¹. Door de grote verscheidenheid aan praktijkomstandigheden en slijtagevariabelen, zijn geen van de bestaande testen volledig geaccepteerd en gestandaardiseerd. Vele speciale en relatief

1. Zie Australian Standard Specifications for Welding Consumables for Build up and Wear Resistance (AS 2576 van 1982)

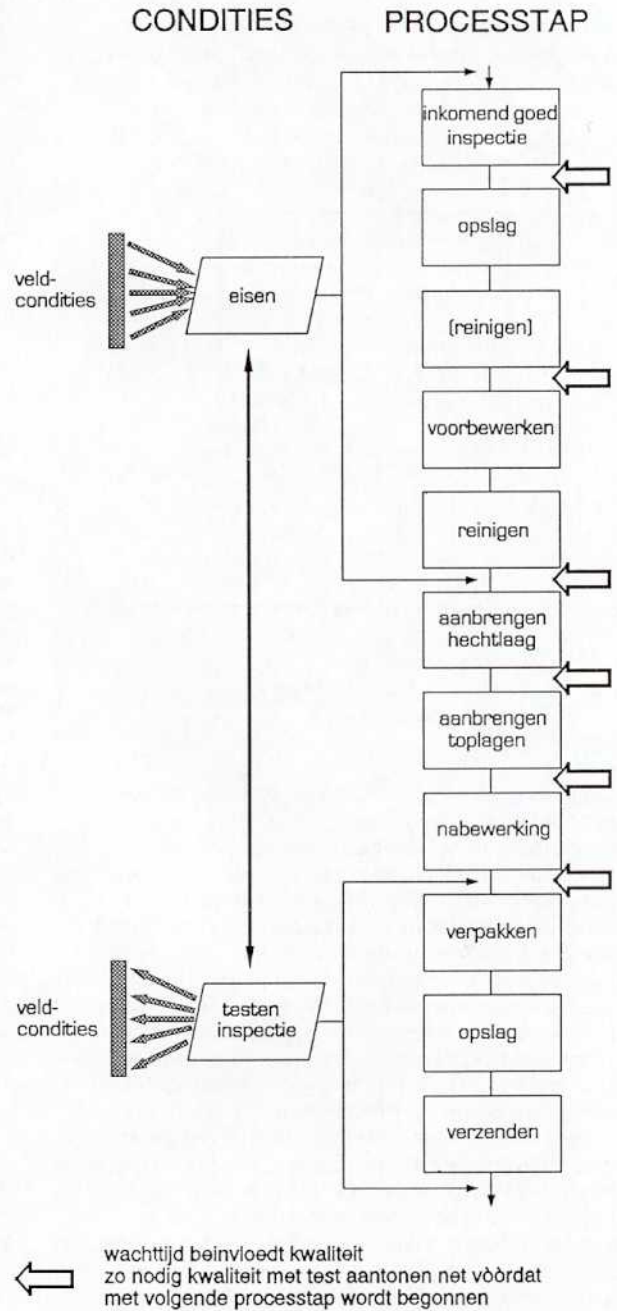
eenvoudige testmethoden worden gebruikt bij de ontwikkeling en rangschikking van de oplos- en opspuitmaterialen, vooral op vergelijkingsbasis, maar zijn beperkt in hun mogelijkheid om het gedrag onder praktijkomstandigheden te voorspellen. Waar mogelijk moeten ze de praktijkomstandigheden zo dicht mogelijk 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 stofertsen 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 noorden van Zweden - nog bevroren is.

4.3.5 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 3.1 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 eenzelfde systeem dat onder gelijke condities werd getest. Dit aspect maakt het nog wel mogelijk voor kwaliteitsborging zelf scherpe testen op te zetten. Figuur 4.10 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.

Deze vorm van ingangscntrole 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 omlaagingen 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



figuur 4.10 Positie kwaliteitstesten in productieproces

de figuren 2.1 en 3.1. Hoe testen moeten worden ingericht wordt voornamelijk bepaald door het doel.

Te onderscheiden zijn:

Research-testen

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

Ontwikkel-testen

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.

Prototype-testen

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.

Betrouwbaarheidstesten

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 punt 4.3.3.

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 overdrachtstest 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 koopdelen

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".

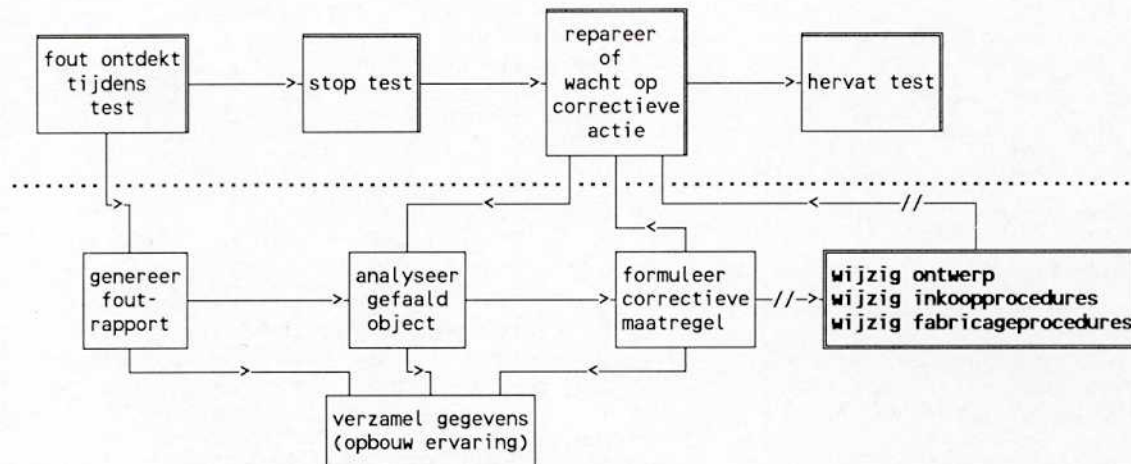
Productietesten

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 deklagen 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 (zie hoofdstuk 7). 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 4.11 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 4.11 Analyse van testresultaten

Hoofdstuk 5

Oplassen en opspuiten

5.1 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 paren 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).

Als de opmenging te groot is kunnen andere processen, zoals thermisch spuiten, galvanotechnieken, opdampen (PVD/CVD) en lasercladden, hierin voorzien (zie ook 2.3 en 5.2).

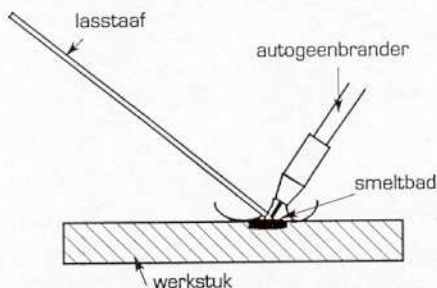
Ondanks het feit dat het booglassen met beklede elektrode (111) geen hoge neersmelt snelheid heeft, zijn er toch mogelijkheden voor dit proces. De oorzaak is de grote flexibiliteit van dit proces. Ook wordt het autogeenlassen (311) en het TIG-lassen (141) voor de wat kleinere werkstukken nog steeds toegepast.

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

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

5.1.1 Autogeenlassen

Bij het autogeenlassen (zie figuur 5.1) wordt zowel het werkstuk als het op te lassen materiaal tot smelten gebracht. Men kan in vele posities lassen maar de neersmelt snelheid is laag. Met dit proces kan men ook "opsolderen", waarbij slijtvaste wolframcarbiden worden ingesmolten in bijvoorbeeld een bronzen matrix op een koolstofstalen ondergrond.

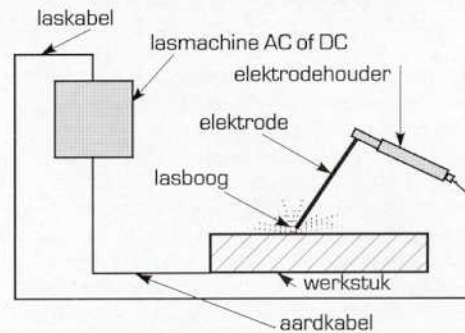


figuur 5.1 Het principe van oplassen door middel van autogeenlassen

5.1.2 Elektrische booglasprocessen

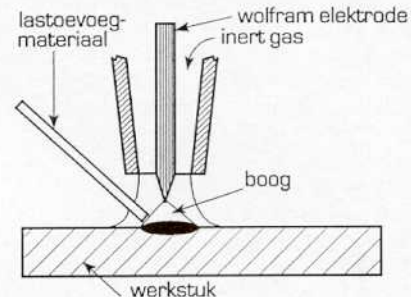
- ▶ Het booglassen met beklede elektrode (zie figuur 5.2) wordt uitgevoerd met een afsmeltende elektrode van de gewenste oplaslegering. De

bekleding van de elektrode zorgt voor het beschermgas en de benodigde 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 oplasmateriaal) materiaal opbrengen. De opmenging met het basismateriaal kan relatief groot zijn en de neersmelt snelheid is in het algemeen laag.



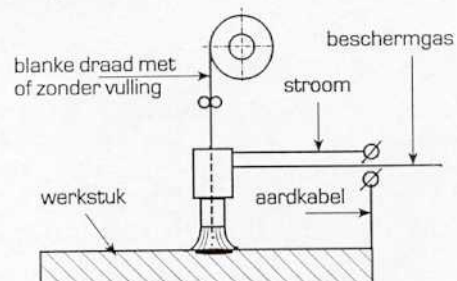
figuur 5.2 Het principe van oplassen door middel van booglassen met beklede elektrode

- ▶ Het TIG-lassen (zie figuur 5.3) wordt uitgevoerd door een boog te trekken met een niet-afsmeltende elektrode van wolfram of een wolframlegering. Het oplasmateriaal en het beschermgas worden gescheiden toegevoegd. Het proces is geschikt voor zuiver en nauwkeurig oplaswerk. De neersmelt snelheid is laag en de opmenging gering.



figuur 5.3 Het principe van TIG-lassen

- ▶ MIG/MAG-lassen met massieve draad (zie figuur 5.4). 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 5.4 Het principe van oplassen door middel van MIG/MAG-lassen

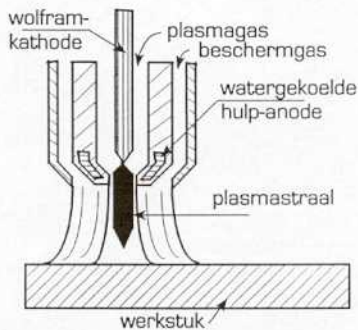
Het pulsbooglassen wordt veel toegepast voor roestvast staal en niet-ijzer legeringen. Het openbooglassen (met gevulde draden) wordt veelal gebruikt voor het oplassen van slijtvaste lagen. Men maakt hierbij onderscheid tussen:

- lassen onder gasbescherming (MAG; 136);
- lassen zonder gasbescherming met gasloze of luchtdraden (114).

Voordelen van luchtdraad zijn:

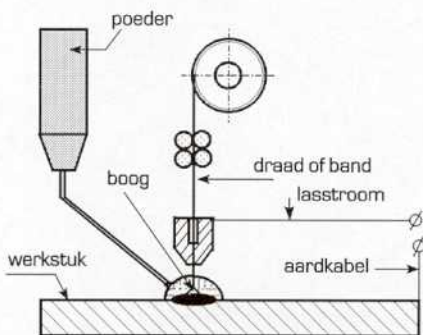
- eenvoudige apparatuur;
- ongevoelig voor tocht en wind;
- hogere neersmelt door een grotere uitsteeklengte.

- Plasma omlassen (zie figuur 5.5) 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 omlassen van kleine onderdelen.



figuur 5.5 Het principe van plasma omlassen

- Onder poeder omlassen met draad of band (zie figuur 5.6) wordt uitgevoerd met een afsmeltende elektrode bestaande uit het oplasmateriaal 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 opmenging is hoog.

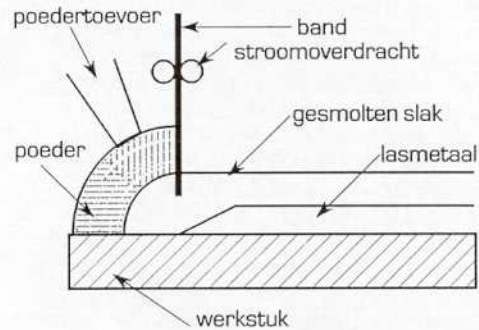


figuur 5.6 Het principe van onderpoeder omlassen

5.1.3 Elektroslak omlassen

Bij elektroslak omlassen (zie figuur 5.7) wordt de benodigde smeltwarmte verkregen door de ohmse weerstand van de slak tussen het werkstuk en de elektrode (er is geen boog!). Elektroslak omlassen 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 neersmelt-

snelheid oplopen tot 45 kg/h (ES ESO-lassen genoemd: extended stick-out).



figuur 5.7 Het principe van elektroslak omlassen

5.1.4 Explosief omlassen

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 5.8 schematisch weergegeven. De bekledingsplaat wordt met afstandstukjes op een constante afstand ten opzichte van de basisplaat gehouden. De basisplaat wordt meestal ondersteund met een zwaar stalen blok om tijdens het proces tegendruk te leveren. 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 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.



figuur 5.8 Het principe van explosief omlassen

5.2 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 **plasma spuiten**.

Een schematische indeling van de thermische spuitprocessen naar energiebron is weergegeven in figuur 5.9.

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. Gelijkijdig 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.

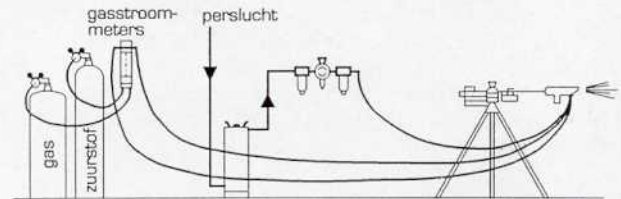
Evenzo kenmerkend voor de thermische spuittechniek is het ontbreken van een smeltbad van deklaag en substraatmateriaal, zoals wel aanwezig bij de opasprocessen. De proceswarmte wordt praktisch alleen gebruikt om materiaaldeeltjes die de deklaag gaan vormen, te verhitten en niet om het substraat te verwarmen. 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 lokatie, 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 goed-hechtende deklagen 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 5.9 worden hier besproken. Voor een uitgebreidere beschrijving wordt verwezen naar de voorlichtingspublicatie VM 95 "thermisch spuiten".

5.2.1 Autogeen draadspuiten

Autogeen draadspuiten is het oudste proces dat uit de vinding van dr. Schoop is ontwikkeld. Het proces is een eenvoudige en economische deklagenteknik. 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. Daarna wordt het gesmolten draadmateriaal vervolgens door perslucht naar het substraat verstoven om daar een deklaag te vormen. In figuur 5.10 is schematisch een autogene draadspuitinstallatie weergegeven.

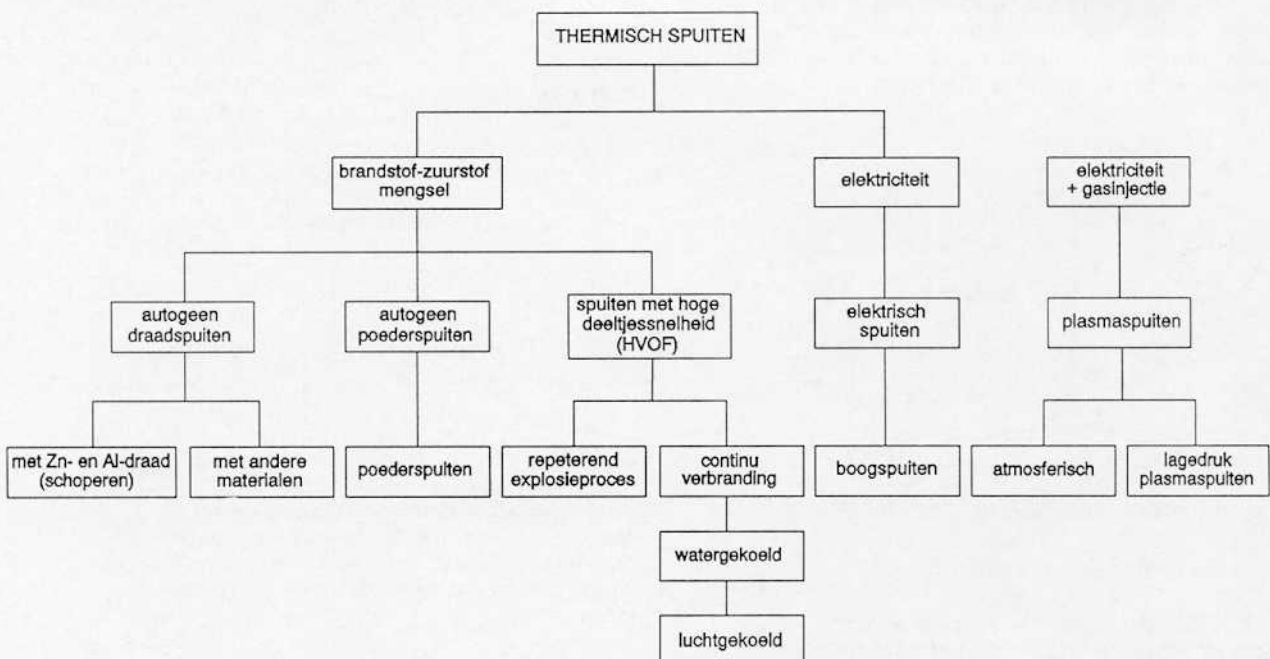


figuur 5.10 Principeschema van een autogene draadspuitinstallatie

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, moulding-techniek, bescherming, opvulling, dikke lagen voor reparatie, verbeteren van loopeigenschappen of wrijvings-eigenschappen en het spuiten van witmetaal lagen.

In de praktijk vinden zink, aluminium en zink-aluminiumlegeringen het meeste toepassing. Keuzecriteria voor genoemde materialen zijn de pH-factor en de bedrijfstemperatuur. De globale toepassingsgebieden voor zink en aluminium voor



figuur 5.9 Schematisch overzicht thermische spuitprocessen

anticorrosiedoeleinden zijn:

ZINK (99,9%)

landelijke omgeving	pH 8 - 10,5
zoet water	pH 6,5
basisch milieu	(water)temperatuur maximaal 60°C

ALUMINIUM

industriële omgeving	pH 3 - 6,5
(99,5%) zout water	pH 6,5 - 8
zuur milieu	oplossingen specifiek bij verhoogde temperatuur

Ten opzichte van verfsystemen heeft het opspuiten met zink en aluminium de volgende voordelen:

- de levensduur is aanmerkelijk groter, namelijk 10 à 15 jaar;
- de applicatie is minder afhankelijk van klimatologische omstandigheden;
- geeft een betere hechting op de voorbehandelde ondergrond;
- de lagen zijn minder gevoelig voor mechanische beschadigingen (transport, opslag, bouw);
- de lagen zijn ongevoelig voor UV-veroudering;
- de lagen zijn onmiddellijk "droog" na het aanbrengen en kunnen gelijk op laagdikte worden gecontroleerd;
- de lagen geven onmiddellijke bescherming;
- de lagen vormen een ideale ondergrond voor een verfsysteem.

Ten opzichte van thermisch verzinken (in een dompelbad) heeft het schoperen de volgende voordelen:

- de objectgrootte is onbeperkt;
- de warmte-inbreng tijdens de applicatie is gering, waardoor de kans op vervorming van het behandelde object niet aanwezig is;
- door de hoge oppervlakteruwheid van de lagen wordt een uitstekende ondergrond verkregen voor een eventueel aan te brengen verfsysteem.

Om andere materialen te verwerken moet het pistool worden aangepast. Het spuitpistool heeft, in vergelijking met een schopeerpistool, een lagere draaddoorvoersnelheid vanwege het hogere smeltpunt van de te verspuiten draad. Voorbeelden van te verwerken materialen en toepassingsgebieden zijn:

STAAL (ongelegeerd en laaggelegeerd)

- ▶ Herstel van geometrie
- ▶ Verhogen slijtvastheid

MOLYBDEEN

- ▶ Verbeteren van de loopeigenschappen voor onderdelen van verbrandingsmotoren

NI-BASIS LEGERINGEN (bijvoorbeeld alloy 625, alloy 276)

- ▶ Verhogen corrosiebestendigheid
- ▶ Verhogen oxidatieweerstand

HARD-OP'LAS'MATERIALEN (hard facing)

- ▶ Hoge weerstand tegen abrasieve slijtage

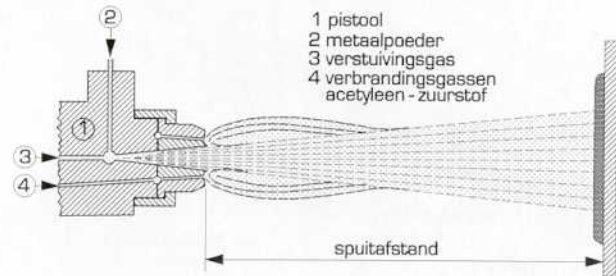
INSMELTLEGERINGEN

- ▶ Weerstand tegen abrasie en/of adhesieve slijtage onder corrosieve condities

5.2.2 Autogeen poederspuiten

Autogeen poederspuiten (zie figuur 5.11) 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 aluminiumoxide 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. Tegenwoordig bedraagt het aantal verschillende poedermaterialen een veelvoud van de beschikbare draadsoorten en heeft dit proces het draadspuiten voor een deel overvleugeld.

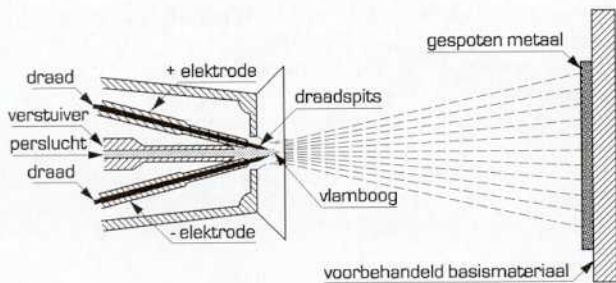


figuur 5.11 Het principe van autogeen poederspuiten

Het systeem wordt vooral toegepast voor het spuiten van de zogenaamde insmeltlegeringen. Deze materialen bevatten naast nikkel, chroom en/of kobalt al of niet met toevoeging van wolframcarbide, ook nog borium en silicium als flux. 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. Het resultaat is een metallurgische verbinding tussen deklaag en substraat met een diffusiezone van enkele tientallen microns. Tevens bereikt men dat de typische kenmerkende microporeuze lamellaire structuur, zoals die bij een "koud" spuitproces ontstaat, niet meer aanwezig is, zodat deze deklagen homogener van structuur zijn. Het voordeel van dit type warm gespoten deklagen is, dat ze beter dan koud gespoten lagen bestand zijn tegen een lijn-, punt- of stootbelasting. Een nadeel is dat, net als bij het oplassen, door de warmte-inbreng de warmtebehandelingstoestand van het basismateriaal wordt beïnvloed.

5.2.3 Elektrisch draadspuiten

Het elektrisch draadspuiten (zie figuur 5.12) 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. Het eerste elektrische spuitpistool werd al in 1920 ontwikkeld. De voordelen van elektrisch draadspuiten zijn de grote spuitcapaciteit en de goede hechting. De mobiliteit van de apparatuur is groot, tegen het proces geschikt maakt om op lokatie te werken.

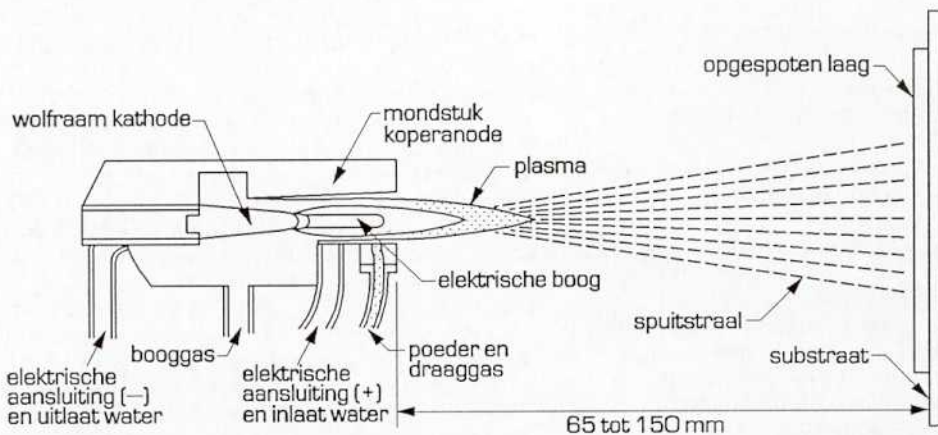


figuur 5.12 Het principe van elektrisch draadspuiten

5.2.4 Plasmaspuiten

Het thermisch spuiten door middel van plasma (zie figuur 5.13) is een poederspuittechniek die de laatste jaren het meest in de belangstelling is gekomen. Dit is te danken aan de specifieke toepassingen die door de hoge proces temperatuur konden worden ontwikkeld. Vooral de ruimtevaart en de vliegtuigmotorenbouw hebben deze ontwikkelingen bevorderd. Begin 1960 werden de eerste serieuze resultaten geboekt bij het vervaardigen van plasmapistolen voor het verspuiten van materialen met een hoog smeltpunt, de zogenaamde refractaire materialen (Mo, W, Ta, Hf, enz.). 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 lage-druk-plasmaspuiten (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 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 mondstuk-opening.



figuur 5.13 Het thermisch spuiten door middel van plasma

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.

5.2.5 Hoge-snelheidspuiten

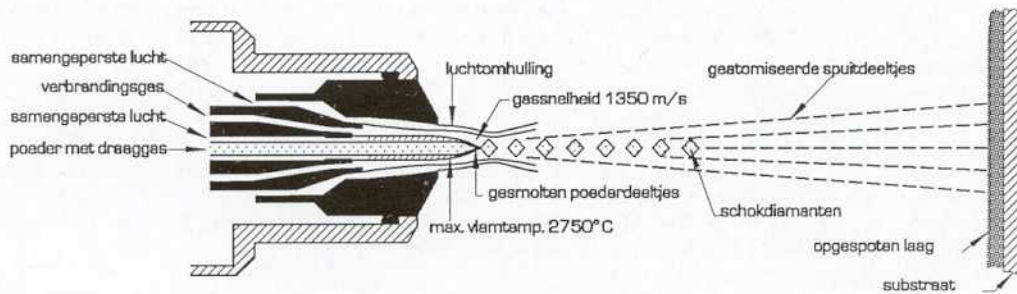
Deze techniek kent verschillende uitvoeringsvormen, elk met een specifiek karakter. Er zijn drie hoofdgroepen te onderscheiden:

- watergekoeld intermitterend explosieproces (detonatie-proces);
- watergekoeld continu verbrandingsproces;
- luchtgekoeld continu verbrandingsproces.

Het kenmerk is dat de poederdeeltjes met een hogere snelheid (gassnelheid tussen 800 en 2200 m/sec, deeltjessnelheid 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 5.14 geeft een voorbeeld van een modern luchtgekoeld principe met gas. Bij de botsing met het werkstuk treden microlas-verschijnselen 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.

5.3 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.



figuur 5.14 Principe van een luchtgekoeld hoge snelheidsspuitproces

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 taaierheid van de opgelaste laag wel enige vervorming van het basismateriaal toestaat.

Een verder onderscheid kan worden gemaakt naar de economie. De tabellen 5.1 en 5.2 geven een overzicht van een aantal processen.

tabel 5.1 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) ⁵	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 laaggelegeerd staal	staal: hoog en laaggelegeerd ³	beperkt	onbeperkt; met massief beperkt	onbeperkt ⁴	onbeperkt ⁴	onbeperkt ⁴
invloed lasser	zeer groot	groot	groot	matig - groot	gering	gering	gering

1) Booglassen met beklede elektrode.
 2) extended stick-out.
 3) Non ferro: beperkt.
 4) Indien gesinterde band wordt meegerekend.
 5) Bij 100% inschakelduur.

tabel 5.2 Opspuitprocessen (100% inschakelduur)

factoren	spuitproces					
	autogeen poeder	autogeen draad	elektrisch boog	APS	VPS	HVOF
spuitpositie ¹	alle	alle	alle	alle	alle	alle
neersmeltsnelheid (kg/uur) ⁵	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 ⁴	onbeperkt	onbeperkt	onbeperkt ²
invloed spuits ³	groot	groot	groot	groot	gering	gering

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

Oplassen en opspuiten geven voor veel toepassingen dekragen met vergelijkbare functionele eigenschappen in termen van slijtage en corrosie. De proceskeuze zal dus voor een belangrijk deel bepaald worden 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 aluminiumoxide-laag kan dus alleen worden gespoten, een hard-metaallaag (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 5.3 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 5.3 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 basismaterialen, 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 poreusheid 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 voorbereiding 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 6

Materialen en materiaalkeuze

6.1 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:

1. Bepaling van de bedrijfsomstandigheden en de gewenste levensduur.
2. Evaluatie van voorafgaande ervaringen onder gelijke omstandigheden.
3. Evaluatie van de bruikbaarheid van de beschikbare legeringen voor de praktijkomstandigheden.
4. 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. Een leidraad hiervoor wordt gegeven in hoofdstuk 7. De voorgaande hoofdstukken geven achtergrondinformatie. De tweede en derde stap moeten theoretische en praktische gebruiksgegevens 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 het 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 moedermateriaal;
- ▶ 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 stap 3 zijn de materialen in deze publicatie gesorteerd naar samenstelling, waarbij globale informatie over de eigenschappen bij de beschrijvingen is opgenomen. De voor het zoeken handigste rubricering zou echter naar eigenschappen zijn. De meeste leveranciers geven echter alleen zeer summiere informatie op dit gebied. Wat zij wel aangeven is het toepassingsgebied. Vaak zijn de materialen in hun documentatie dan ook naar 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 6.1 eerst een overzicht van de effecten van de belangrijkste legeringselementen. Hiermee is het mogelijk een grove voorselectie te maken, die zowel voor oplossen 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.

Indelingen zijn op vele wijzen te maken. Om zoveel mogelijk gebruik te maken van algemeen geldende standaarden is DIN 8555 (Schweißzusätze zum Auftragschweißen) als uitgangspunt gekozen voor de oplasmaterialen en voor het thermisch spuiten DIN 8566 (Deel 1: Zusätze für das thermische Spritzen; Massivdrähte zum Flammsspritzen/Deel 2: Metallspritzdrähte; Lichtbogenspritzdrähte/Deel 3: Zusätze zum Thermischen Spritzen; Fülldrähte und Stäbe zum Flammsspritzen) en DIN 32529 (Pulver zum thermische Spritzen).

6.1.1 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

Vervaardiging:

- ▶ 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 tussengloeijingen en reinigingsprocedures.
- ▶ Gegoten: Kan tot zeer hoge legeringsniveaus 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 legeringsniveaus worden vervaardigd. Lengten en diameters van de staven zijn sterk afhankelijk van de procesfaciliteiten.

Massieve draad (haspelbaar)

Lasprocessen: MIG/MAG, OP, TIG-gemechaniseerd, kerndraad voor elektroden

Vervaardiging:

- ▶ 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

tabel 6.1 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 scheurgevoeligheid 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).
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 oxidatiegebestendigheid 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	verbeterd de weerstand tegen aantasting in maritiem milieu, zwavelzuur en waterstoffluoride bevattende zure milieu's. Vormt de basis voor lagermaterialen. Technische belangrijk zijn koperlegeringen met een open structuur voor zelfsmurende lagers.
Mn	vormt harde microstructuren (martensiet) en maakt bij gehalten boven 12% samen met koolstofstaal 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 blauwbrosheid tot gevolg hebben. Als legeringselement vergroot het 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 verbeterd de thermische stabiliteit. Vormt een goede basis voor het maken van legeringen met uiteenlopende eigenschappen.
Si	verbeterd 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	verbeterd de weerstand tegen corrosie, vooral in oxiderende en chloride-houdende 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 worden verhoogd. 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 milieu's.
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.

legeringsniveaus (>60%) in de neersmelt worden gerealiseerd.

- ▶ Kerndraad + bindmiddel: Op een flexibele kerndraad, bijvoorbeeld 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

Vervaardiging:

- ▶ Gewalst en getrokken: De vereiste bewerkings-eigenschappen van de strip waaruit deze gevulde draad wordt vervaardigd, namelijk verwalsbaarheid en vouwbaarheid, 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

Vervaardiging:

- ▶ Walsen. De verwalsbaarheid beperkt de samenstelling van het band. Laaggelegeerd materiaal is goed walsbaar. Bij hoog gelegeerde materialen worden de elementen die de vervormbaarheid verminderen bij voorkeur in het vulling gedaan. Bij hooggelegeerde materialen wordt zo van hooggelegeerde strip gebruikgemaakt, waarbij de vulling hoofdzakelijk metallisch is met zeer weinig slakvormers. Band en strip met slakvormende elementen is wel verkrijgbaar. De verwalsbaarheid heeft bij hooggelegeerde banden op deze wijze geen beperkingen als gevolg van de samenstelling. Door een gevulde draad plat te walsen ontstaat een gevulde band. Een nagenoeg onbeperkte scala aan samenstelling kan worden bereikt met gesinterde banden.

Buis (niet haspelbaar)

Lasprocessen: Autogeen, TIG, Bmbe

Vervaardiging:

- ▶ 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.

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 wolframcarbide-gehalte 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. Het bijleggen via OP-poeders is gemakkelijker dan bij de ES-poeders. Overleg met de lastoevoegmateriaal-leverancier is dan ook onontbeerlijk.

MATERIAALOVERZICHT

DIN 8555 kent diverse groepen oplasmaterialen. Binnen iedere groep is een groot aantal in samenstelling variërende materialen mogelijk. Bijlage 2 geeft een aantal voorbeelden van iedere materiaalgroep.

1. ONGELEGEERD STAAL (<0,4% C)

Tot 0,4% C of laaggelegeerd tot 0,4% C en max.5% legeringsbestanddelen, inclusief Cr, Mn, Mo en Ni.

De lastoevoegmaterialen worden daar gebruikt waarbij on- of laaggelegeerd staal moet worden opgelast en waar geen bijzondere eisen aan de hardheid van de neersmelt worden gesteld. Het lasmetaal heeft daardoor geen bijzondere slijtage weerstand. Als draad is ongelegeerd materiaal verkrijgbaar voor reparatiedoeleinden. Praktijkvoorbeelden: Zachte deklagen, opvulwerkzaamheden en bufferlagen.

2. ONGELEGEERD STAAL (>0,4% C)

Meer dan 0,4% C of laaggelegeerd met meer dan 0,4% C en tot max. 5% legeringsbestanddelen, inclusief Cr, Mn, Mo en Ni.

Deze materialen hebben een betere slijtage weerstand dan de materialen uit groep 1, door een hardere matrix en een hoger carbidegehalte in het lasmetaal. Verspanende bewerking kan problemen opleveren. Het gebruik is voor reparatie (herstel geometrie na bijvoorbeeld slijtage) en het verhogen van de slijtvastheid als corrosie geen rol speelt of voor corrosiebescherming bij niet te zware slijtbelasting. Enkele spuitlegeringen hebben een verlaagde krimp, waardoor minder restspanningen ontstaan. Praktijkvoorbeelden: Loopwielen, gereedschappen, matrijzen

3. WARMVAST GEREEDSCHAPSSTAAL

Het materiaal heeft de eigenschappen van staal-soorten voor warmbewerking. Het materiaal wordt in de regel daar toegepast waar een hogere hardheid bij temperaturen tot 500°C wordt verlangd. Het materiaal is daarom met Cr, W en in veel gevallen met Mo, Ni en V gelegeerd. Co kan aanwezig zijn. De structuur van de deklaag bestaat meestal uit martensiet met rest-austeniet en carbiden. Ze zijn dus te vergelijken met laaggelegeerde gereedschapsstaalsoorten. De deklaag kan vóór een verspanende bewerking worden zachtgegloeid. De uitgangshardheid kan door een aansluitende harding weer bereikt worden.

Bij het lassen verdient het aanbeveling voor te warmen en langzaam af te koelen ter vermindering van scheuren.

Praktijkvoorbeelden: Bewerkingsgereedschap voor warmvormgeving, lageroppervlakken, brandermondten, reparatie van gelegeerd staal.

4. SNELSTAAL

Het materiaal heeft de eigenschappen van snel-draaistaal. Het toevoegmateriaal bevat W, Mo, Cr, V en in veel gevallen Co. Verspanende bewerking is alleen mogelijk wanneer het oplasmateriaal is zachtgegloeid; anders is het alleen door slijpen te verspanen. In deze samenstelling is het niet verkrijgbaar voor opspuiten.

Praktijkvoorbeelden: Boorkronen, boorkanten, schaarmessen.

5. HOOGGELEGERD, LAAG C

Gelegerd met meer dan 5% Cr en een laag koolstofgehalte (tot ca. 0,2% C). Deze groep omvat de legeringen met een Cr-staal-karakter. Het Cr-gehalte varieert van 5 tot 30% Cr, het C-gehalte tot 0,2%. De hardheid van de neersmelt neemt met het martensietgehalte toe. Het lasmateriaal wordt gebruikt op staalsoorten met eenzelfde samenstelling, maar kan ook op on- of laaggelegerde staalsoorten worden opgelast. Het is naar gelang het C- en Cr-gehalte niet altijd te verspanen. Warmtebehandelingen moeten worden uitgevoerd overeenkomstig gegevens van de fabrikant. Praktijkvoorbeelden: Deklagen, die hittebestendig (ook in zwavelhoudende atmosferen) en vanaf 12% Cr ook roestvast moeten zijn, zoals ventielen, plunjers en delen van ovens. Rollen van continu gietmachines.

6. HOOGGELEGERD, HOOG C

Gelegerd met meer dan 5% Cr en een verhoogd C-gehalte (ca. 0,2 tot 2,0%). Deze groep lijkt veel op groep 5. Tengevolge van het hoge C-gehalte ligt de hardheid echter boven 500 HB en is de corrosievastheid minder. Het oplasmateriaal is luchthardend en meestal slechts door slijpen te bewerken. Voorwarmen op 200 tot 300°C is raadzaam. Praktijkvoorbeelden: Snijwerktuigen, walsen voor koudwalsen, schaarmessen.

7. AUSTENITISCH MANGAANSTAAL

Het materiaal bevat 11 tot 18% Mn en meer dan 0,5% C en tot 3% Ni en is niet magnetisch. Deze legeringsgroep geeft een lasmateriaal, dat overeenkomt met mangaan-hardstaal. Het lasmetaal is goed voor die delen, die door druk of stoot koudversteefd worden. Daardoor kan de hardheid, afhankelijk van de mate van versteving, van ca. 180 HB tot ca. 550 HB oplopen. Het is niet geschikt voor toepassingen waarbij alleen abrasieve slijtage optreedt. Het materiaal moet tijdens het lassen zo koud mogelijk worden gehouden om een goede taaigheid te behouden en warscheuren te voorkomen. Praktijkvoorbeelden: Brekerplaten, puntstukken in wissels, brekerconussen, maalrollen.

8. AUSTENITISCH MANGAANSTAAL MET VERBETERDE CORROSIEBESTENDIGHEID

De toevoeging van chroom maakt het materiaal taaier dan het materiaal uit groep 7. De koudversteving is minder, echter het materiaal is corrosievast. Het vereist geen warmtebehandelingen, het materiaal is verspanend te bewerken en is niet magnetisch. Praktijkvoorbeelden: Delen van brekers, tongen en puntstukken van wissels, spoorstaven en delen van waterturbines.

9. AUSTENITISCH STAAL (ROEST-, ZUUR- EN HITTEBESTENDIG)

De lastoevoegmaterialen komen overeen met die

voor het verbindingslassen. Zij kunnen op staalsoorten met vergelijkbare samenstelling, op Cr-staalsoorten alsook op constructiestaalsoorten worden aangebracht. Deze materialen worden daar gebruikt waar een goede corrosie- en/of oxidatieweerstand van het lasmateriaal van belang is. De neersmelt kan koudversteefd worden en is verspanend te bewerken. Praktijkvoorbeelden: Corrosie- en hittevaste deklagen.

10. LEDEBURITISCH GIETIJZER

De neersmelt van dit toevoegmateriaal komt overeen met de hoog koolstof houdende staalsoorten met of zonder carbidevormende elementen. Het C-gehalte varieert tussen 2 en 7%; het Cr-gehalte kan oplopen tot 40%. Het lasmateriaal bevat complexe carbiden in een austenitische matrix. De hardheid neemt met een toenemend C-gehalte toe en kan door een warmtebehandeling niet verhoogd worden. Het materiaal kan slechts door slijpen worden bewerkt. De scheurgevoeligheid van deze legering kan door voorwarmen iets verminderd worden. Het materiaal is uitermate goed bestand tegen abrasieve slijtage. Praktijkvoorbeelden: Onderdelen voor de metallurgische industrie, zoals hoogovenklokken en trechters, Paul Würth-goten, sinterbrekers en machines in de bouw en landbouw. Maalrollen en tafels van kolovergruizers in elektriciteitscentrales.

20. KOBALTBASIS (CR EN W)

De kobalt-chroom legeringen hebben een goede slijtage-, corrosie- en oxidatieweerstand ook bij hogere temperaturen. De hardheid bij hogere temperaturen is de dominerende eigenschap van deze legeringen. Gebruik tot 800°C. De materialen met hoger C-gehalte gebruikt men daar waar een hoge hardheid en een grote slijtageweerstand noodzakelijk zijn. Voorwarmen op 400 tot 600°C gevolgd door een langzame afkoeling wordt aanbevolen. Een verdere warmtebehandeling is niet noodzakelijk. Kobalt is een kostbaar, strategisch belangrijk metaal. Voor diverse stellietachtigen zijn daarom equivalenten bijvoorbeeld op nikkel- en ijzerbasis beschikbaar. Praktijkvoorbeelden: Klepzittingen en uitlaatskleppen van verbrandingsmotoren; pompassen en soortgelijke delen, die aan zware corrosie en erosie zijn blootgesteld.

21. CARBIDE-BASIS (GESINTERD, GEGOTEN OF GEVULD)

De karakteristieke eigenschappen van het lasmateriaal van deze groep zijn afhankelijk van het Cr- en het W-carbidegehalte. In de regel worden voorgesinterde of voorgegoten zuivere W- of Cr-carbiden als staven verlast of voor de fabricage van gevulde draad, respectievelijk gevulde staven gebruikt. De neersmelt heeft een zeer hoge weerstand tegen abrasieve slijtage. De taaigheid hangt af van de hoeveelheid carbiden in de zachte grondmassa van het bindmiddel. Voorwarmen op 400 tot 600°C wordt aanbevolen, gevolgd door een warmtebehandeling. Praktijkvoorbeelden: Werktuigen en machinedelen voor werkzaamheden in rotshoudende grond, boren, enz., persschroeven in de keramische industrie.

22. NIKKEL-BASIS

Het lasmateriaal van de Ni-Cr-B toevoegmaterialen heeft een hoge slijtageweerstand tegen wrijving van metalen op elkaar en een grote hardheid bij hogere temperaturen. De hardheid bij kamertemperatuur neemt met een toenemend Cr- en B-gehalte toe. De hardheid ligt tussen 30 en 60 H_{RC}. De neersmelt is bruikbaar tot temperaturen van 500 °C; is naargelang de legering in deegachtige toestand warmvervormbaar. Bij het lassen is voorwarmen tot ca. 400 °C nodig, daarna geen warmtebehandeling. Praktijkvoorbeelden: Kleppen, assen bijvoorbeeld voor cementpompen.

23. NIKKEL-BASIS, HOOGWARMVAST

De Ni-Cr-Mo-legeringen hebben bijzonder goede bewerkings-eigenschappen bij hogere temperaturen. De hardheid kan door een geëigende warmtebehandeling opgevoerd worden. Praktijkvoorbeelden: Gereedschappen voor bewerkingen bij hogere temperaturen, contactvlakken van kleppen bij chemische apparaten. Platering van snijkanten van Ni-Mo-legeringen, die bij hoge temperaturen gebruikt worden.

30. BRONZEN

Deze materialen omvatten koper-tin-legeringen met gehalten van 6 tot 12% Sn en P-gehalten tot 0,5%. De hardheid is afhankelijk van het tingehalte en ligt tussen 60 en 130 HB en. Deze legeringen kenmerken zich door een goede weerstand tegen glijdende slijtage en goede noodloopeigenschappen; zij zijn bestand tegen zoutoplossingen en zuren. Praktijkvoorbeelden: Lagerschalen, lagerhuizen, afsluiterhuizen, assen, schuiven, geleide- en loopwielen, armaturen.

31. KOPER-ALUMINIUMLEGERINGEN

Het toevoegmateriaal bevat als hoofdlegerings-element 5 tot 13,5% Al. De binaire legeringen hebben een hardheid van 100 tot 400 HB en een goede chemische bestendigheid. Door te legeren met Fe, Ni en Mn worden de mechanische eigenschappen, de corrosie weerstand en ook de verwerkingseigenschappen wezenlijk beïnvloed. Praktijkvoorbeelden: Machine-onderdelen en armaturen in de chemische industrie, papier en elektro-industrie. Goede weerstand tegen adhesieve slijtage bij een onvolkomen smering en hoge slagbelasting. Het materiaal heeft een goede weerstand tegen cavitatie. Voor glijlagers (ook grootschalig zoals bij krukastappen) wordt het vaak toegepast.

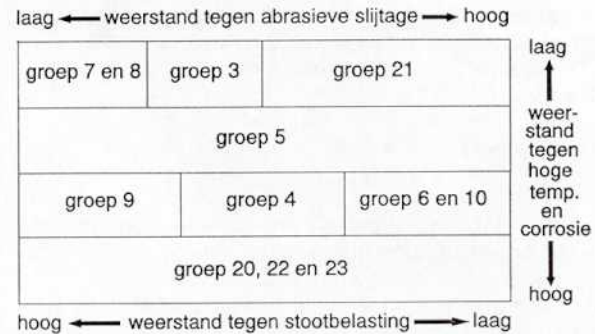
32. KOPER-NIKKELLEGERINGEN

Het lasmateriaal van de Cu-Ni-legeringen bevat 5 tot 45% Ni met gehalten tot 1,5% Fe en 3,5% Mn. De hardheid bedraagt tot 160 HB; het materiaal is niet gevoelig voor spanningscorrosie in zeewater. Praktijkvoorbeelden: Destilleerapparaten, zeewaterleidingen, condensoren, chemische apparaten en warmtewisselaars.

Bovenstaande indeling is goed bruikbaar voor het maken van een gerichte materiaalkeus. In het schema

van figuur 6.1 is voor een groot aantal groepen uit DIN 8555 een rangschikking gemaakt, waarbij de keuzecriteria zijn opgenomen, zoals:

1. Invloed belasting.
2. Temperatuurbestendigheid.
3. Corrosiebestendigheid.



figuur 6.1 Overzicht toepassingsgebied op lasmaterialen

Een door de British Steel Corporation uitgegeven standaard voor slijtagebestrijding geeft in een aantal groepen een wat fijnere indeling. Zie hiervoor de Corporate Engineering Standard (CES) 23 'Applied surfaces for wear protection'. Deze standaard bestaat uit 4 delen. Deel 1 geeft informatie over opgelaste lagen. Deel 2 gaat over opgespoten lagen. Deel 3 gaat over slijtbestendige voeringen en deel 4 geeft een flink aantal praktijkvoorbeelden.

6.1.2 Materialen voor opspuiten

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 eenzelfde 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 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. We beginnen met een overzicht van de vormen waarin de materialen worden aangeboden.

Draad

Draad voor vlamspuiten en voor elektrisch spuiten is grotendeels gelijk. Qua samenstelling komen ze veelal overeen. De DIN stelt lagere eisen aan de nauwkeurigheid van draad voor het elektrisch boogspuiten. Gevulde draden bestaan ook. Deze zijn in afmetingen aangepast voor vlamspuiten. Er worden voornamelijk keramische lagen, zelfvloeiende legeringen en hardmetalen mee opgebracht. Door het omhullen van het niet-elektrisch geleidende keramiek met een geleidende mantel wordt de beperking van het elektrisch spuiten, dat alleen geleidend toevoegmateriaal accepteert, opgeheven.

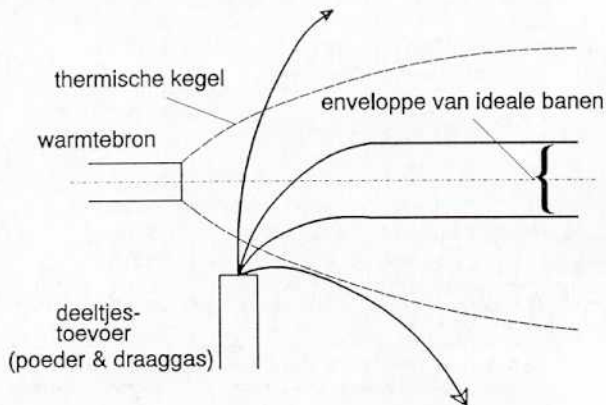
Poeder

Er is een groot aantal basisvormen en de wijze van fabriceren levert een brede range aan korrelgroottes op, die door middel van zeven in - voor de diverse processen geschikte - fracties worden gezeefd. Hoe beter deze fractie is gedefinieerd, hoe homogener de deklaag zal zijn; de kostprijs zal echter hoger worden. De kwaliteit van een poeder wordt daarom, naast de chemische samenstelling, bepaald door:

- korrelvorm;
- fabricageproces;
- zuiverheidsgraad;
- korrelgrootte en -verdeling.

Gezamenlijk bepalen zij in hoge mate de transport- en smelteigenschappen. De transporteigenschappen bepalen het 'loopgedrag' van het poeder van hopper tot pistool en de baan die wordt afgelegd van pistool naar werkstuk.

De smelteigenschappen bepalen in welke toestand een poederdeeltje het werkstuk treft. Smelteigenschappen moeten dus goed zijn afgestemd op de baan die wordt afgelegd. Een ideaal poeder bestaat uit ronde deeltjes van één afmeting die een baan volgen nabij het hart van de thermische kegel (zie figuur 6.2).



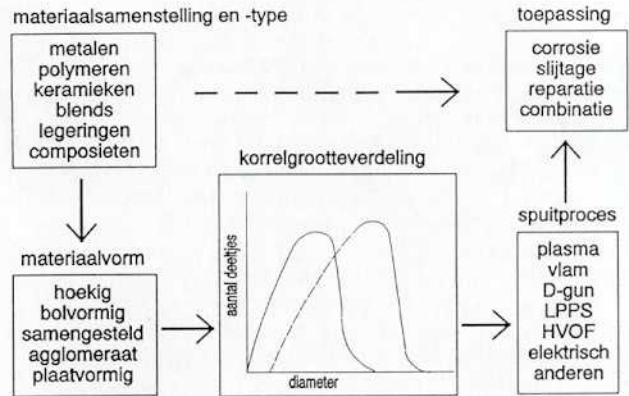
figuur 6.2 Deeltjesbaan na injectie poeder (plasma)

Met de technisch leverbare poeders zullen altijd aan het een of andere aspect concessies worden gedaan. Hierdoor zijn een goede specificatie en kwaliteitscontrole van poeders van groter belang dan bij draad en staf, te meer daar er verschillende poedertoevoersystemen bestaan. Hierdoor treden variaties op in de volgende factoren:

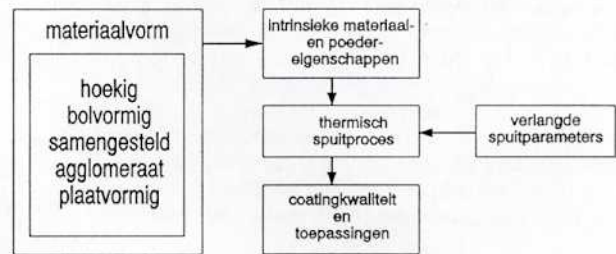
- massa getransporteerde deeltjes per tijdseenheid;
- toegevoerd volume schermgas en dragergas per tijdseenheid;
- positie waar het poeder in de gasstroom wordt geïnjecteerd.

Daarom is grote voorzichtigheid geboden als een deklaag door verschillende leveranciers moet worden aangebracht. Figuur 6.3 brengt de relaties in beeld. De belangrijkste directe relatie is tussen poedersamenstelling en toepassing, zoals aangegeven door de gestippelde pijl.

De materiaalvorm kan worden gemeten met een optische of rasterelektronenmicroscop en bepaalt met welke parameters het proces moet worden uitgevoerd. Een andere vorm vereist dus andere instellingen (zie figuur 6.4).



figuur 6.3 Relaties tussen materiaal en toepassing



figuur 6.4 Invloed poedervorm

De korrelvorm wordt bepaald door het fabricageproces, waarbij niet één proces leidt tot 100% dichte en homogene korrels. De vorm bepaalt voornamelijk het 'loopgedrag' in het transport van hopper naar pistool. Een bolvorm heeft het beste loopgedrag. De korrelgrootteverdeling bepaalt vooral de microstructuur van de deklaag. In verband met de relatief smalle enveloppe van ideale banen binnen de thermische kegel, moet men, voor een zo laag mogelijke poreusheid, streven naar een zo klein mogelijke bandbreedte. Tabel 6.2 geeft een overzicht.

Daarnaast kunnen poeders bij het spuiten worden aangevoerd door meer poorten tegelijk. Dit heeft als voordeel boven het blenden dat een continue range van samenstellingen mogelijk is en de verhouding ook tijdens het sluiten kan worden veranderd (zgn. graded coatings). Voorbeelden van deklaagvormen zijn te vinden in hoofdstuk 2.4 van VM 95.

De korrelvorm kan indirect worden afgeleid uit het loopgedrag. Een perfect lopend materiaal is vrijwel zeker bolvormig met een glad oppervlak en homogeen van korrelgrootte. Hieronder vallen dus naast de verstoven poeders ook gesproeidroogde sol-gel, gesinterde en geagglomerde typen. Als bij dergelijke poeders toch een inhomogene deklaag ontstaat, kan dit erop wijzen dat er door elektrostatische lading, veel zeer fijne deeltjes ($< 1 \mu\text{m}$) aan de korrels kleven.

Behalve de vorm is ook de verdeling van de korrelgrootte belangrijk. Zeven kan hierbij worden gebruikt zowel voor het verdelen van de fracties als voor het meten ervan. Bij geagglomerde poeders moet men oppassen. De binding van de geagglomerde deeltjes kan zo laag zijn dat deze door sterk trillende zeven wordt verbroken. Dit geeft een fout beeld van de verdeling. DIN 32529 geeft een indeling van de fracties (zie tabel 6.3).

tabel 6.2 Overzicht van poederfabricageprocessen

poederfabricageproces	korrelvorm	typische materialen
breken en malen	onregelmatig, hoekig	keramiek, hoge zuiverheid mogelijk Verontreiniging door slijtage
verstuiving (water)	onregelmatig, rond	nikkel- en kobaltbasislegeringen, extra stappen nodig voor ontwatering en verlaging zuurstofgehalte
verstuiving (gas)	bolvormig	CoCr-legeringen, NiCr-legeringen, nikkel- en koperbasislegeringen, voorgelegeerd Ni5Al type, zink, aluminium, RVS, reactieve materialen (bijvoorbeeld Ti), MCrAlY's, zeer hoge zuiverheid haalbaar
sol-gel (algemeen)	bolvormig, vezels, plaatjes; zowel poreuze als dichte agglomeraten mogelijk	chromoxide, aluminiumoxide en gestabiliseerd zirkoonoxide
sol-gel (sproeidrogen)	bolvormig	zie sol-gel, zeer fijne poeders mogelijk
agglomereren of sinteren	regelmatig, rond met uitstulpingen	Co-WC typen, composieten bijvoorbeeld aluminiumoxide met titaandioxide, gerecyclede fijne resten van andere processen, vaak lagere sterkte en hechting, maar relatief goedkoop
coaten	bolvormig, ruw oppervlak	composieten, slijtwillige typen
HOSP	holle bolletjes	aluminiumoxide-, zirkoonoxide- en chromoxidebasis typen; uitstekende loopeigenschappen, homogener deklagen
agglutineren	onregelmatig, afgerond hoekig	composieten, vrijwel elke combinatie mogelijk
blenden	afhankelijk van type	speciale legeringen, afstemmen van loopgedrag deeltjes kritisch

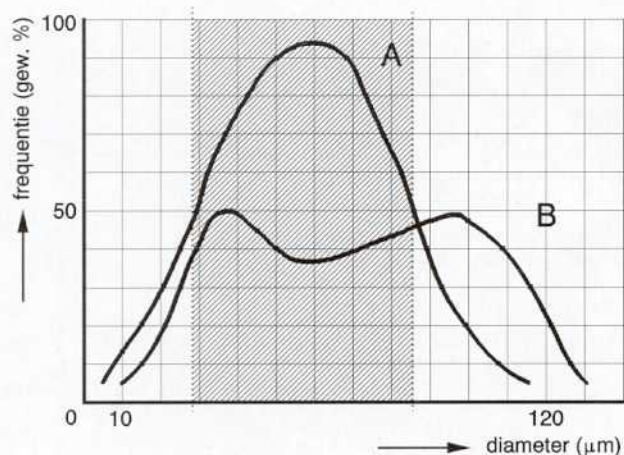
tabel 6.3: Korrelgrootteverdelingsklassen volgens DIN 32529 en ASTM B 214-86

kengetal (DIN)	korrelgroottebereik (μm)	MESH (ASTM)	toepassing
0	-22,4 +5,6	100	
1	-45 +22,4	120	HVOF
2	-90 +45	140	Sterk poreuze materialen o.a. voor filters
3	-45 +5,6	200	Dichte en slijtbestendige lagen met lage oppervlakteruwheid in gespoten toestand, zeer glad te slijpen
4	-63 +16	230	Vlam- en plasmaspuiten. Glad oppervlak in gespoten toestand en grotere dichtheid dan bij klasse 6
5	-106 +32	325	
6	-125 +45	400	Poreuze, slijtwillige deklagen

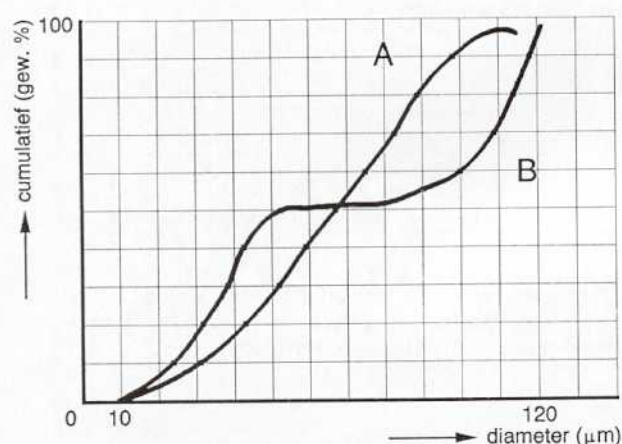
Het min(-)teken geeft aan dat de korrels door deze zeef vallen en blijven liggen op de met plus(+) aangeduide zeef. Om een echt glad oppervlak te krijgen zijn deze klassen te grof. Moderne poedertransporteurs zijn in staat fijne en smallere fracties te verwerken (bijvoorbeeld $-12,5 +5,6 \mu\text{m}$) die nodig zijn voor een zeer glad oppervlak. Het HVOF spuiten vereist doorgaans klasse 1 poeders. Bij het vlamspuiten geeft men de voorkeur aan een iets grover poeder, klasse 2. Het plasmaspuiten is goed in te stellen op de korrelgrootte en kan daardoor een brede range grootten aan. Meestal worden wel poeders beneden $100 \mu\text{m}$ gekozen.

Doorgaans wordt aangenomen dat binnen een klasse de korrelgrootten normaal verdeeld zijn. Dit is zeker niet altijd het geval, zodat voor kritische toepassingen de leverancier moet worden gevraagd een grafiek, volgens figuur 6.5 van de verdeling mee te leveren. De grafieken a en b zijn uit elkaar af te leiden. Het verloop van type B kan beter worden vermeden. Deze lijn representeert een bimodaal poeder waarvan de loopeigenschappen minder goed te voorspellen zijn. De scherpte van de verdeling volgens A is een maat

voor de homogeniteit, hoe smaller de curve hoe meer deeltjes met eenzelfde korrelgrootte aanwezig zijn. Een brede, platte curve duidt op een verspreiding van de deeltjes over een brede range aan korrelgroottes. Is een homogene poeder gewenst, bijvoorbeeld om een gladde, slijtvaste deklaag te maken, dan kan men eisen stellen aan de vorm en het verloop van de curven. Men kan bijvoorbeeld verlangen dat 80% van de deeltjes valt binnen een gebied van $\pm 50\%$ rondom het klassegemiddelde (zie het gemarkeerde gebied in figuur 6.5a). Ook kan men vragen dat de werkelijk gemiddelde waarde niet meer dan bijvoorbeeld $\pm 10\%$ afwijkt van het gemiddelde van de klasse. Voor elke klasse geeft dit aantal bandbreedtes waarbinnen men zaken accepteert. Figuur 6.6 brengt één en ander in beeld.

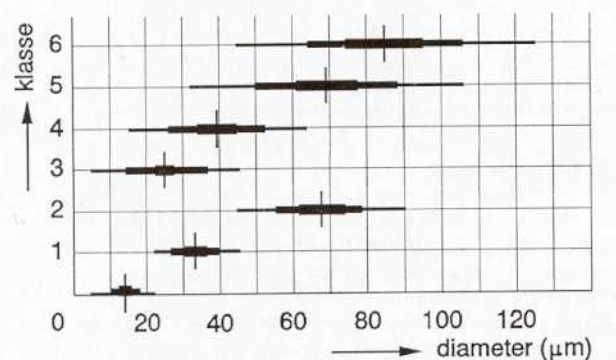


(a)



(b)

figuur 6.5 Verdelingsgrafieken voor korrelgrootte: (a) frequentie, (b) cumulatief



— totale bandbreedte — 80% band ■ band gemiddelde waarde

figuur 6.6 Bandbreedtes voor acceptatie van korrelgrootteverdelingen

MATERIAALOVERZICHT

In de voorlichtingspublicatie VM 95 "Thermisch spuiten", hoofdstuk 2 is, net als in dit document, de indeling volgens DIN gevolgd, waarbij ook een codering gebaseerd op de samenstelling is gebruikt. Omwille van de herkenbaarheid wordt dit ook hier aangehouden. Voor de opbouw van de aanduiding: zie paragraaf 6.2. Naast de in de DIN bladen genoemde materialen is ook een groot aantal commerciële materialen opgenomen. In een publicatie als deze kunnen echter geen merknamen worden

vermeld. Het aantal commerciële materialen overstijgt aanzienlijk het aantal genormeerde zodat het opzoeken van de materialen niet eenvoudig zal zijn. Voor het samenstellen van de tabellen in bijlage 1 is een groot aantal catalogi geraadpleegd. Ze kunnen echter geen aanspraak maken op volledigheid en zijn alleen bedoeld om richting te geven bij het maken van een keuze.

1. ONGELEGEERD STAAL EN LAAGGELEGEERD STAAL

Hieronder vallen draden die, afhankelijk van het koolstofgehalte, zachte tot harde ongelegeerde lagen geven voor reparatie en verbetering van de slijtvastheid. De materialen komen overeen met gewone staalsoorten.

2. HOOGGELEGEERD STAAL

Deze groep bevat alle corrosievaste en slijtvaste RVS typen en superlegeringen op ijzerbasis. Veel materialen worden door leveranciers aangeduid met hun AISI nummer. De structuur en samenstelling zal echter afwijken van gesmeed of gewalst materiaal.

3. ALUMINIUM EN ALUMINIUMLEGERINGEN

In deze groep komen voornamelijk materialen voor die bescherming bieden tegen atmosferische en galvanische corrosie.

4. KOPER EN KOPERLEGERINGEN

Koper heeft een goede geleiding en wordt daarom veel gebruikt in elektrotechnische toepassingen. Naast zuiver koperdraad (Cu 99,9) en -poeder (Cu 99) zijn ook diverse legeringen voor lagertoepassingen en enkele speciale anti-fretting legeringen beschikbaar.

5. LOOD- EN TINLEGERINGEN

De groep is een verzameling van zware materialen voor verschillende toepassingen, waaronder bescherming tegen zuurcorrosie, glijlagers en elektrische contacten. Daarnaast zijn legeringen voor matrijzen en 'rapid prototyping' opgenomen op basis van Sn-Zn.

6. NIKKEL EN NIKKELLEGERINGEN

Zuiver nikkel (Ni 99,2) wordt o.a. gebruikt voor elektrisch draadspuiten in combinatie met ijzerbasisdraden om passingsvlakken te herstellen (lage krimp). Ni 99,3 is de poederversie.

insmeltlegeringen

Lage wrijvingscoëfficiënt en goede weerstand tegen corrosie en slijtage, algemeen gebruik.

hechtlagen

Deze hebben naast het verbeteren van de hechting van de deklaag aan het basismateriaal tot doel om bescherming te bieden tegen corrosie en oxidatie, waarvoor zij een barrière vormen. Sommige legeringen verdragen hoge temperaturen.

andere legeringen

Dit is een verzamelgroep van nikkel-basis superlegeringen. Ze worden gebruikt voor bescherming tegen corrosie, oxidatie en slijtage. Daarnaast is deze groep van groot belang voor

hoge temperatuur toepassingen. Deze materialen verliezen bij langdurige expositie aan hoge temperaturen niet of nauwelijks hun toch al hogere mechanische eigenschappen. Verder zijn in de groep slijtwillige legeringen opgenomen op basis van Ni-C.

cermets

Een mengsel van Ni-Al 18,5 met 35% ZrO_2 -CaO 5 is als DIN poeder verkrijgbaar.

7. MOLYBDEEN EN MOLYBDEENLEGERINGEN

Deze groep materialen heeft specifieke eigenschappen voor loopvlakken met lage wrijving, verbetering van de hechting tussen lagen bij meerlaagssystemen en zelfhelende materialen voor bescherming tegen oxidatie bij temperaturen boven 1000°C.

8. KOBALTLEGERINGEN

stellietachtigen

De groep kobaltlegeringen voor slijtagebestrijding is zeer breed en bestrijkt hardheden tussen ca. 25 en 60 H_{RC} . Ze vinden vooral toepassing bij de bestrijding tegen abrasie en erosie voor bijvoorbeeld grondverzet, verbrandingsmotoren en turbines. Een aantal kan koud verstevigen en zijn daarmee zeer geschikt voor plet- en walsrollen.

cermets

In deze groep vallen compounds van zelfvloeiende legeringen op kobaltbasis en hardmetalen op basis van WC-Co. Deze zijn vooral geschikt voor het beschermen tegen slijtage van moeilijk lasbare materialen.

andere

Een verzamelgroep van enkele speciale legeringen die ook in gesmede vorm te krijgen zijn.

9. TITAAN EN TITAANLEGERINGEN

De materialen hebben verschillende toepassingen op basis van hun goede weerstand tegen aantasting door chloride-rijke waterige media. De zuivere vorm wordt o.a. gebruikt voor medische implantaten. Verder een speciale legering die beschermt tegen erosie bij hoge temperatuur en die ook als giet- en smeedmateriaal verkrijgbaar is.

10. RESTGROEP ZUIVERE METALEN

Zink

Zn 99,99 is leverbaar in draadvorm en wordt voornamelijk gebruikt voor bescherming tegen atmosferische corrosie. Het proces staat ook bekend als 'Schoperen'. Een speciale commerciële uitvoering wordt gebruikt voor het maken van matrijzen voor een breed scala aan productieprocessen (o.a. RIM, vacuümvormen) en ornamenten. Voor een beter oppervlak wordt voor de toplaag een draad van een Kirksite-type (Zn-AlCu 4-3) gebruikt.

Silicium

Si 99 is leverbaar als poeder (DIN).

Tantaal

Ta 99 is leverbaar als poeder (DIN) voor het VPS en LPPS proces voor toepassingen in de

chemische industrie waar een zeer hoge corrosieweerstand wordt gevraagd.

Niobium

Nb 99 is leverbaar als poeder (DIN) voor gebruik in VPS of LPPS voor hoge corrosievastheid in sterke reducerende zuren. Oxidatiegevoelig.

Chroom

Cr 98,5 is leverbaar als poeder (DIN).

Wolfram

W 99,5 is leverbaar als poeder (DIN). Een commerciële versie W 99,0 wordt aangeboden voor bescherming tegen corrosie in sterke zuren en logen. Het heeft ook een hoge weerstand tegen vonkerosie.

11. METAALCARBIDEN

De groep bestaat voor het merendeel uit cermets die zijn opgebouwd uit een hoog bestanddeel carbiden, ingebed in een matrix van kobalt, nikkel, nikkel-chroom of een compound van een metaal als kobalt met een insmeltlegering. De materialen op basis van WC met kobalt lijken op hardmetalen. Ze worden voornamelijk gebruikt voor slijtagebestrijding. De compounds met NiCr materialen geven een grote slijtvastheid onder corrosieve condities en toepassingen in oxiderende media bij hoge temperatuur. Chroomcarbide kan ook zonder metaalbinder worden toegepast. Het geeft zeer harde en dichte lagen die ook oxidatiebestendig zijn tot ca. 900°C.

12. METAALNITRIDEN

Deze kleine groep is genormeerd volgens DIN. Toepassingen zijn niet bekend.

13. METAALBORIDEN

Deze groep is genormeerd volgens DIN. Toepassingen zijn niet bekend. Gesinterde boriden hebben een uitstekende weerstand tegen erosie en oxidatie.

14. OXIDEN

De groep is een brede verzameling van oxidische keramische materialen. Zie bijlage 1 voor specifieke typen en toepassingen.

15. SULFIDEN

Molybdeendisulfide is een poeder dat gebruikt wordt als vaste smeestof.

16. MCRAALY DEKLAGE

Deze groep wordt vooral toegepast in gasturbines voor bescherming tegen corrosie bij hoge temperatuur, oxidatie en gaserosie. De 'M' staat voor het basismetaal dat nikkel, ijzer, kobalt of een combinatie hiervan kan zijn. Er zijn veel op elkaar lijkende poeders ontstaan, omdat gasturbinefabrikanten zeer specifieke eisen stellen en deze vastleggen in specificaties. Hieraan liggen niet alleen technische maar vooral ook commerciële redenen aan ten grondslag. Ze worden dan ook meestal aangeboden onder het betreffende specificatienummer.

6.2 Aanduidingen

6.2.1 Oplassen

De materiaalaanduiding volgens DIN 8555² wordt in drie blokken onderverdeeld, namelijk:

1. Het benamingsblok, bijvoorbeeld lasstaaf, beklede elektrode, lasdraad, gevulde draad, enz..
2. Het norm nummer (DIN 8555).
3. Het kenmerkblok.

Het kenmerkblok bestaat uit:

- a. De codeletter voor het lasproces:
 - G = gasbooglassen (Bmbe)
 - E = booglassen met beklede elektrode
 - MF = MAG-lassen met gevulde draad
 - WSG = TIG-lassen
 - MSG = MIG-lassen
 - UP = onder poeder lassen
- b. Het code getal voor de legeringsgroep (zie overzicht § 6.1.1)
- c. Eventueel opgaaf van de uitvoering:
 - GW = gewalst
 - GO = gegoten
 - GZ = getrokken
 - GS = gesinterd
 - GF = gevuld
 - UM = bekleed
- d. Opgaaf van de hardheidsklasse (zie tabel 6.4)
- e. Opgaaf van de eigenschappen van de neersmelt:
 - C = corrosiebestendig
 - G = bestand tegen abrasieve slijtage
 - K = geschikt voor koudversteving. De slijtage eigenschappen van de neersmelt zijn van een koudverstevende nabehandeling afhankelijk. Zij kan door hameren of persen, maar ook zonder een dergelijke nabehandeling bereikt worden, door blootstelling aan druk-, rollende of slagbelasting, bijvoorbeeld bij mangaanhardstaal.
 - N = Niet magnetiseerbaar
 - P = Bestand tegen stotende belasting
 - R = Voorkomt roestvorming
 - S = Bestand tegen een snijdende belasting
 - T = Warmvast (temperatuurvast in de zin van warmvaste gereedschapsstaalsoorten)
 - Z = Hittebestendig, dat wil zeggen voor temperaturen > 600°C

Voorbeelden:

Beklede elektrode DIN 8555: E31-UM-300-C
 E : Bmbe
 31 : legeringsgroep 31(Cu-basis, Al gelegeerd)
 UM : bekleed
 300 : 275-325HB
 C : Corrosiebestendig

tabel 6.4 Hardheidsklassen

hardheidstrappen	hardheidsgebied
150	125-175 HB
200	175-225 HB
250	225-275 HB
300	275-325 HB
350	325-375 HB
400	375-450 HB
40	37-42 H _{Rc}
45	42-47 H _{Rc}
50	47-52 H _{Rc}
55	52-57 H _{Rc}
60	57-62 H _{Rc}
65	62-67 H _{Rc}
70	> 67 H _{Rc}

Gevulde draad DIN 8555: MF10-GF-65-GT
 MF : MAG-lassen met gevulde draad
 10 : legeringsgroep 10 (hoog C en hoog Cr gelegeerd)
 GF : gevuld
 65 : 62-67 H_{Rc}
 G : bestand tegen abrasieve slijtage
 T : warmvast

De Amerikaanse norm AWS A5.13-80 voor oplaslegeringen onderscheidt net als DIN 8555 ook groepen op Fe, Ni, Co en Cu-basis, maar beperkt zich tot enkele materialen met nauwe analysegrenzen. Tabel 6.5 geeft als voorbeeld de kobaltbasislegeringen.

Naast DIN 8555 voor oplasmaterialen worden ook lastoefoegmaterialen voor corrosie- en hittevaste toepassingen gebruikt die ook bij het verbindingslassen worden toegepast. Bijvoorbeeld DIN 8556: Roestvaste staalsoorten en DIN 1736: Lastoefoegmaterialen voor nikkel en nikkellegeringen.

Leveranciersaanduidingen en equivalente materialen

Vrijwel alle leveranciers volgen de DIN groepenindeling. De groepenindeling is echter dermate ruim dat veel materialen met onderling sterk verschillende eigenschappen hier in passen. In bijlage 2 worden per materiaalgroep een aantal voorbeelden hiervan gegeven. Gebruikelijk is naast de eigen productnaam meerdere normaanduidingen aan te geven. Op grond hiervan zou het mogelijk zijn te beoordelen of materialen equivalent zijn. Het zal echter op grond van het voorgaande duidelijk zijn dat hiermee voorzichtig moet worden omgegaan.

tabel 6.5 Kobalt-chroom legeringen (groep 20) volgens DIN 8555 en AWS-A5.13-80

DIN 8555 Groep 20	Hardheid H _{Rc}	AWS-A5.13-80				Bekend als
		type	%C	%Cr	%W	
C 0,7-3,0% Cr 25,0-30,0% W 3,0-25,0% Co Basis	40	CoCrA	0,7-1,4	25,0-32,0	3,0-6,0	Stellite 6*
	50	CoCrB	1,0-1,7	25,0-32,0	7,0-9,5	Stellite 12*
	60	CoCrC	1,7-3,0	25,0-33,0	11,0-14,0	Stellite 1*

* Officiële naam volgens Cabbot

2. Deze norm is geldig voor lastoefoegmaterialen van ongelegeerd en laaggelegeerd staal, alsook voor harde legeringen, hardmetalen en niet-ijzermetalen voor het oplassen van bij voorkeur metalen op ijzerbasis. Poedervormige en bandvormige oplasmaterialen zijn in deze norm niet opgenomen.

6.2.2 *Thermisch spuiten*

De aanduidingen gebruikt in dit document zijn opgebouwd uit het hoofdelement met daarachter de belangrijkste legeringselementen. Van de eerste twee wordt het gehalte aangegeven. Bijvoorbeeld Fe-CrMnNiSi 18-8,5 is een ijzerbasismateriaal met 18% chroom, 8,5% mangaan, nikkel en silicium en komt ongeveer overeen met AISI 201. Deze regel wordt ook gevolgd met keramische materialen en intermetallische verbindingen. Zo is bijvoorbeeld $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{SiO}_2\text{FeO}$ 3-3 de aanduiding voor zwart aluminiumoxide met 3% TiO_2 en 3% SiO_2 . Bij monomaterialen geeft het cijfer er achter de zuiverheid aan, bijvoorbeeld Mo 99,9 bestaat voor tenminste 99,5% uit molybdeen. Al_2TiO_5 99 is aluminiumtitanaat met max. 1% verontreinigingen. Bij blends worden de samenstellende materialen tussen vierkante haken geplaatst, bijvoorbeeld $[\text{Cr}_3\text{C}_2]\text{-(Ni-Cr 20)}$ 25 bestaat uit een mengsel van 75% Cr_3C_2 en 25% Ni-Cr 20.

Leveranciersaanduidingen en equivalente materialen

De DIN schrijft aanduidingen op basis van de chemische samenstelling of het 'Werkstoffnummer' voor. Bijvoorbeeld DIN 8566-Sd-ALMg5-2 is een aluminiumdraad voor vlamspuiten met 5% magnesium met een diameter van 2 mm. De andere aanduiding voor deze draad is DIN 8566-3.3556-2. Als dit materiaal wordt gebruikt als draad voor het elektrisch draadspuiten, wordt de code Sd (Spritzdraht) vervangen door LSd (Lichtbogenspritzdraht). Bij poeders heeft men voor een andere vorm gekozen. Hier wordt de aanduiding opgebouwd uit een willekeurig opgebouwde code uit tabellen die voor een materiaalgroep staan en de korrelgrootteklasse. Calciumoxide gestabiliseerd zirkoonoxide (tabel 10, DIN 32529 deel 1) met een korrelgrootte tussen 5,6 en 45 μm (DIN 32529 Kennziffer 3) wordt dan aangeduid als K5-3 DIN 32529.

Leveranciers volgen deze aanduidingen nauwelijks, zeker niet in Nederland. Zij gebruiken hun eigen merknamen. Dit levert een groot aantal verschillende aanduidingen op voor hetzelfde materiaal wat de overzichtelijkheid niet bevordert. Dat zij hier zelf ook problemen mee hebben moge blijken uit het feit dat hun documentatie vaak een kruisverwijzingstabel bevat met aanduidingen van de equivalente materialen van anderen. De hierin gesuggereerde equivalentie blijkt in veel gevallen aanvechtbaar en moet dan ook zeer voorzichtig worden benaderd. De inhoud van dergelijke tabellen komt geheel voor rekening van de leveranciers, zodat nader overleg met hen altijd noodzakelijk is.