FME

metaalunie

NIL

thermisch spuiten

vm 95

Vereniging voor
Vlamspuittechnieken (VVV)

thermisch spuiten

VM 95
een uitgave van de

Vereniging FME

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

© Vereniging FME/november 1992

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere 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 publikatie betrokkenen alle aansprakelijkheid voor schade als gevolg van onjuistheden en/of onvolkomenheden in deze publikatie van de hand.

Vereniging FME
Afdeling Technische Zaken
Postbus 190, 2700 AD Zoetermeer
Telefoon (079) - 53 11 00
Telefax (079) - 53 13 65
Telex 32157 fme nl

ISBN 90-71306-55-0

thermisch spuiten

toelichting:

Deze voorlichtingspublikatie is tot stand gekomen door samenwerking van het Nederlands Instituut voor Lastechniek (NIL) en de Vereniging voor Vlamspuittechnieken (VVV) in het kader van het NIL-project "Thermisch spuiten" en is mede mogelijk gemaakt door een bijdrage van het Ministerie van Economische Zaken.

samengesteld door:

dr.ir. J.M. Houben (TU-Eindhoven) en ing. D. v.d. Torre (Consultweld)

samenstelling werkgroep:

ir. P. Boers	Vereniging FME, Zoetermeer
dr.ir. J.M. Houben	Technische Universiteit, Eindhoven
C.F. Hulst	Hermann C. Starck Berlin, Bennekom
ing. H.E. de Jonge	Michaël Holland Chroom, Amsterdam (voorzitter)
ing. T.G. Kraak	Metco Nederland, Breda
dr. B. Krismer	Hermann C. Starck Berlin, Goslar
A. Mourik	Plasma-Service, Breda
ing. P.J. van Tilborg	ECN, Petten
ing D. v.d. Torre	Consultweld, Holten
ing S. Verboon	Verboon Vlamspuittechnieken, Harmelen
ing M. van Wonderen	KLM, Schiphol-Oost

samenstelling stuurgroep:

AGA Gas, Amsterdam	ir. P. Bruinsma
AKZO, Hengelo	ing. J. van Valkenhoef
Aludra, Vlaardingen	A. van Keulen Sr.
Consultweld, Holten	ing. D. v.d. Torre
DSM Research, Geleen	ing. H.J.J. Colaris
ECN, Petten	ing. P.J. van Tilborg
Elbar, Lomm	dr. L. Heijnen
FDO Technische Service, Amsterdam	ing. J.E. Buter
Hobart Brothers Company, Amsterdam	ing. M.P. Zwetsloot
Hoogovens, IJmuiden	C.H. Does
Hydraudyne, Boxtel	ir. W. Voskuyl
IPL-TNO, Apeldoorn	A. Arun Junai, dr. P.J.J. Ramaekers
KEMA, Arnhem	ir. W.M.M. Huijbregts, ir. J.W. Noteboom
KLM, Schiphol-Oost	ing. M. van Wonderen
Metco Nederland, Breda	ing. T.G. Kraak (tot 1-5-'92) M.L. Scholte
Michaël Holland Chroom B.V., Amsterdam	ing. H.E. de Jonge
Ned. Inst. voor Lastechniek, Apeldoorn	mw. R.H. Schoegje ir. G.H.G. Vaessen
Ned. Philipsbedrijven, Eindhoven	ing. G.A. te Raa
Nederlandse Spoorwegen, Utrecht	ing. L.P. van der Sloot
NLR, Emmeloord	J.A.M. Boogers
Plasma-Technik, Maasbree	ing. W.A.M. Daniels
Revamo, Meppel	ir. R.J. Rijkmans
Rijkswaterstaat, Voorburg	D. Ros
Shell, Int. Petroleum Mij., Den Haag	dr. R.A. Bartlett
SKF Eng. & Research Centre, Nieuwegein	ing. M.B. Verburgh
Technische Universiteit, Eindhoven	dr.ir. J.M. Houben P.L.H. de Waal
Thomassen International, Rheden	ir. R. Zaalberg
Vereniging FME, Zoetermeer	ir. P. Boers

technische informatie:

Nederlands Instituut voor Lastechniek

- bezoek- en correspondentie-adres	Krimkade 20, 2251 KA VOORSCHOTEN
- telefoon	071 - 611211
- telefax	071 - 611426

Vereniging voor Vlamspuittechnieken

- bezoekadres	Jan van Eycklaan 2, BILTHOVEN
- correspondentie-adres	Postbus 120, 3720 AC BILTHOVEN
- telefoon	030 - 287111
- telefax	030 - 287674

informatie over en bestelling van VM-publikaties:

Vereniging FME, afdeling Technische Zaken

- bezoekadres	Boerhaavelaan 40, ZOETERMEER
- correspondentie-adres	Postbus 190, 2700 AD ZOETERMEER
- telefoon	079 - 531341/531100
- telefax	079 - 531365

Metaalunie

- bezoekadres	Einsteinbaan 1, NIEUWEGEIN
- correspondentie-adres	Postbus 2600, 3430 GA NIEUWEGEIN
- telefoon	03402 - 53344
- telefax	03402 - 53122

Inhoud

1 ***Thermische spuitprocessen*** 9
1.1 Inleiding 9
1.2 Beschikbare spuitprocessen 9
1.2.1 Autogeen draadspuiten 9
1.2.1.1 Algemeen 9
1.2.1.2 Autogeen draadspuiten met Zn- en Al-draad 10
1.2.1.3 Autogeen draadspuiten met andere materialen (metalliseren) 11
1.2.2 Autogeen poederspuiten 12
1.2.2.1 Algemeen 12
1.2.2.2 Standaarduitvoering 12
1.2.3 Elektrisch spuiten 12
1.2.4 Plasmaspuiten 13
1.2.4.1 Algemeen 13
1.2.4.2 Het plasma spuitproces 13
1.3 Verdere ontwikkelingen van de spuitprocessen 14
1.3.1 Autogeen spuiten met hoge deeltjessnelheid 14
1.3.2 Explosieproces 14
1.3.3 Hoge snelheidsprocessen met continu verbranding (HVOF-processen) 15
1.3.3.1 Watergekoeld continu verbrandingsproces 15
1.3.3.2 Luchtgekoeld continu verbrandingsproces 15
1.3.4 Plasmaspuiten 16
1.3.4.1 Lagedruk plasmaspuiten 16
1.3.4.2 Hoge energie plasmaspuiten 16

2 ***Opspuitmaterialen*** 18
2.1 Algemeen 18
2.2 Massieve draden voor het autogeen spuiten 18
2.2.1 Toelichting bij de aanduidingen van draden en staven 18
2.2.2 Massieve draden voor het elektrisch spuiten 19
2.2.3 Gevulde draden voor het autogeen en elektrisch spuiten 19
2.2.4 Staven voor het autogeen spuiten 19
2.3 Toepassing van draadvormige opspuitmaterialen 20
2.3.1 Hechtmaterialen 20
2.3.1.1 Nikkel-aluminiumcomposiet 20
2.3.1.2 Molybdeen 20
2.3.2 Staal 20
2.3.2.1 Fe-MnC 21
2.3.2.2 Fe-CMn 0,85 21
2.3.2.3 Fe-NiMnCrMo 4-2 21
2.3.3 Roestvast staal 21
2.3.3.1 Fe-Cr 13 21
2.3.3.2 Fe-NiCrMn 19-9,5 (AISI 304) 21
2.3.3.3 Fe-NiCrMo 19-11,5 (AISI 316) 21
2.3.3.4 Fe-CrMnNiSi 18-8,5 (AISI 201) 21
2.3.4 Non-ferro metalen 21
■ Anti-corrosietoepassingen 21
2.3.4.1 Aluminium 21
2.3.4.2 Zink (Zn 99,9) 22
2.3.4.3 Zn-Al 15 22
2.3.4.4 Ni-CuFe 28-1,5 (Monel) 22
2.3.4.5 Nikkel 22
■ Toepassingen bij slijtage 22
2.3.4.6 Sn-SbCu 7,5-3,5 (witmetaal) 22
2.3.4.7 Cu-AlFe 9-1 (aluminiumbrons) 22
2.3.4.8 Molybdeen (Mo 99,9) 22
■ Diverse toepassingen 23
2.3.4.9 Koper (Cu 99,8) 23
2.3.4.10 Tin (Sn 99,8) 23
2.4 Thermische spuitpoeders 23
2.4.1 Kenmerken en vervaardiging van poeders 23
2.4.1.1 Chemische samenstelling 24
2.4.1.2 Korrelgrootte 24
2.4.1.3 Korrelgrootteverdeling 24
2.4.1.4 Korrelvorm 24

2.4.2 Niet-insmeltmaterialen 24
2.4.2.1 Zuivere metalen en legeringen 24
2.4.2.2 Carbiden 26
2.4.2.3 Omhulde poeders 26
2.4.2.4 Oxyden 27
2.4.3 Poedervormige insmeltmaterialen 28
2.4.3.1 Op basis van nikkel-chroom-borium-silicium 28
2.4.3.2 Op basis van kobalt-chroom-borium-silicium 29
2.5 Verdere ontwikkelingen van opspuitmaterialen 29
2.5.1 Holle spuitpoeders 29
2.5.2 'One step' poeders 30

3 ***Hechtingsmechanismen bij het opspuiten*** 31
3.1 Inleiding 31
3.2 Procestechnische invloeden 31
3.3 Interactie van het spuitmateriaal met het werkstuk, opbouw van de laag 33
3.4 Invloed van de uitvoering van het spuiten 33
3.4.1 Spuitafstand 33
3.4.2 Poederinjectie in de spuitvlam 33
3.4.2.1 Grove deeltjes 34
3.4.2.2 Poederdeeltjes in het centrum van de boog of de vlam 34
3.4.2.3 Poederdeeltjes aan de rand van de boog of de vlam 34
3.5 Dampontwikkeling 34

4 ***Keuzecriteria thermische spuitprocessen en -materialen*** 35
4.1 Technische overwegingen 35
4.1.1 Slijtagevormen 35
4.1.1.1 Abrasieve slijtage 35
4.1.1.2 Adhesieve slijtage 36
4.1.1.3 Vermoeiingsslijtage 36
4.1.1.4 Erosieve slijtage 36
4.1.1.5 Slijtwillige lagen 36
4.1.2 Keuze van opspuitmaterialen 37
4.1.3 Keuze van het spuitproces 38
4.2 Economische overwegingen 38
4.2.1 Kostenposten 38
4.2.2 Investeringskosten apparatuur 39
4.2.3 Gas- en energiekosten 39
4.2.4 Kosten opspuitmaterialen 39
4.2.5 Berekening van produktiekosten 39
4.2.5.1 Welke kosten worden behandeld 39
4.2.5.2 Het bepalen van de hoeveelheid op te spuiten materiaal 40
4.2.5.3 Opbrengst bij het opspuiten en opspuittijd 40
4.2.5.4 Berekening van de kosten 41

5 ***Voorbehandeling*** 42
5.1 Reinigen 42
5.2 Gritstralen 42
5.3 Voordraaien 43
5.4 Voorwarmen 43
5.5 Conclusies 43

6 ***Nabehandeling*** 44
6.1 Insmelten van opspuitpoeders 44
6.1.1 Met de vlam 44
6.1.2 In een oven 44
6.1.3 Met inductie 45
6.1.4 Met een laserbundel 45
6.2 Impregneren (sealen) van opgespoten deklagen 45
6.2.1 Een was op paraffine basis 45
6.2.2 Een luchtdrogend phenol-impregneermiddel 45
6.2.3 Een anaërobe impregneermiddel 45
6.3 Het aanbrengen van verfsystemen 46
6.4 Het machinaal nabewerken van opgespoten lagen 46
6.4.1 Draaien van opgespoten lagen 46
6.4.2 Slijpen van opgespoten lagen 46
6.4.3 Honen, superfijnen en leppen 47

7 ***Praktijkvoorbeelden*** 49
7.1 Inleiding 49
7.2 Indeling van de gegevens 49
7.3 Autogeen poederspuiten 49
7.4 Autogeen draadspuiten 53
7.5 Elektrisch spuiten 56
7.6 Plasmaspuiten 59
7.7 HVOF spuiten 61

8 ***Afnamecontrole van opgespoten lagen*** 63
8.1 Algemeen 63
8.2 Mechanische eigenschappen 63
8.2.1 Hechtsterkte 63
8.2.2 Treksterkte 63
8.2.3 Afschuifsterkte 64
8.2.4 Hardheidsmetingen 64
8.3 Deklaageigenschappen in verband met het gebruik 64
8.3.1 Abrasietest 65
8.3.2 Straalerosietest 65
8.3.3 Krasvastheidstest 65
8.4 Corrosietesten 65
8.4.1 Luchtoxidatietest 65
8.4.2 Testen in corrosieve milieus 66
8.5 Porositeitsmeting 66
8.6 Gasdoorlaatbaarheidstest 66
8.7 Niet destructief onderzoek (NDO) 66
8.7.1 Algemeen 66
8.7.2 Visuele inspectie 66
8.7.3 Penetrant onderzoek 67
8.7.4 Ultrasoon onderzoek 67
8.7.5 NDO-ontwikkelingen

9 ***Inrichting van de werkplaats en automatisering*** 68
9.1 Te installeren apparatuur 68
9.2 Plaatsing van de apparatuur 69
9.3 Mechanisering en automatisering 69

10 ***Gezondheid en veiligheid*** 71
10.1 Inleiding 71
10.2 De Arbo-wet 71
10.3 Industriële ventilatie 71
10.4 Bescherming van de omgeving 71
10.5 Persoonlijke bescherming 71
10.5.1 Dampen 73
10.5.2 Straling, oogbescherming 73
10.5.3 Geluid, gehoorbescherming 73
10.5.4 Hoge temperaturen 73
10.5.5 Bescherming tegen elektriciteit 73
10.6 Opslag en gebruik van gassen 74

Literatuur 75

Hoofdstuk 1

Thermische spuitprocessen

1.1 Inleiding

Het thermisch spuiten omvat een aantal technieken voor het aanbrengen van deklagen op voorwerpen van allerlei soort en materiële samenstelling. Dit kunnen zijn machine-onderdelen, delen van apparaten of installaties en zelfs kunstvoorwerpen.

Kenmerkend voor de thermische spuittechniek is het gebruik van thermische energie. Die kan afkomstig zijn van de verbranding van acetyleen, propaan, propyleen of waterstof, zoals bij het vlamspuiten. De thermische energie kan ook van elektrische oorsprong zijn, bijvoorbeeld zoals bij het plasmaspuiten en het elektrisch boogspuiten.
De thermische energie dient ertoe het aan te brengen deklaagmateriaal, in de vorm van poederdeeltjes of draad, op te warmen tot om en nabij het smeltpunt. Gelijktijdig wordt het materiaal versneld tot minimaal enkele tientallen meters per seconde. Door deze snelheid ontstaat er een gerichte straal van spuitdeeltjes die het mogelijk maakt dat voorwerpen op een zekere afstand (bijvoorbeeld 100 mm) in elke positie kunnen worden voorzien van een deklaag.

Evenzo kenmerkend voor de thermische spuittechniek is het ontbreken van een smeltbad van deklaag en substraatmateriaal, zoals wel aanwezig is bij oplasprocessen. 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 "koudspuitproces" genoemd.

De spuitdeeltjes dienen over voldoende thermische en kinetische energie te beschikken om goed hechtende deklagen te kunnen vormen. Het deklaagmateriaal heeft soms, zeer bewust gekozen, sterk van het substraatmateriaal afwijkende eigenschappen, zoals bijvoorbeeld bij een combinatie van een keramische deklaag en een stalen substraat. 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.

Een deklaag is gewenst of noodzakelijk wanneer het basismateriaal niet bestand is tegen de aantasting van het oppervlak door bijvoorbeeld slijtage of corrosie. Slijtage en corrosie zijn typische oppervlakteprocessen die tot een ongewenste verkorting van de levensduur leiden. De vereiste optimale combinatie van basismateriaaleigenschappen met die van het oppervlak is door één materiaal niet altijd op te brengen. Vandaar dat de technieken voor het modificeren of het aanbrengen van de vereiste oppervlaktegesteldheid zich mogen verheugen in een groeiende industriële belangstelling.

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. Vanuit de reparatiepraktijk is steeds meer gebleken dat een onderdeel na het opspuiten zijn geplande functie beter en langer kan vervullen dan het oorspronkelijke niet opgespoten onderdeel. Mede daardoor vindt de thermische spuittechniek reeds op grote schaal toepassing op nieuw te vervaardigen produkten in bijvoorbeeld de petrochemische industrie, de luchtvaart en de automobielindustrie.
De plaats die de thermische spuittechniek inneemt onder de oppervlaktetechnieken is onder meer goed te karakteriseren aan de hand van de gangbare produktiesnelheid en de haalbare laagdikte.
Bij het thermisch spuiten wordt doorgaans een laagdikte van circa 0,05 mm tot 3 millimeter toegepast, maar dunnere en dikkere lagen zijn zeker mogelijk.

1.2 Beschikbare spuitprocessen

Het metaalspuiten is omstreeks 1910 door de Zwitser Max Ulrich Schoop het eerste toegepast. De ontwikkeling betreffende de benodigde spuitapparatuur om tot reproduceerbare deklagen op een substraat te komen heeft sindsdien vele fasen doorlopen.

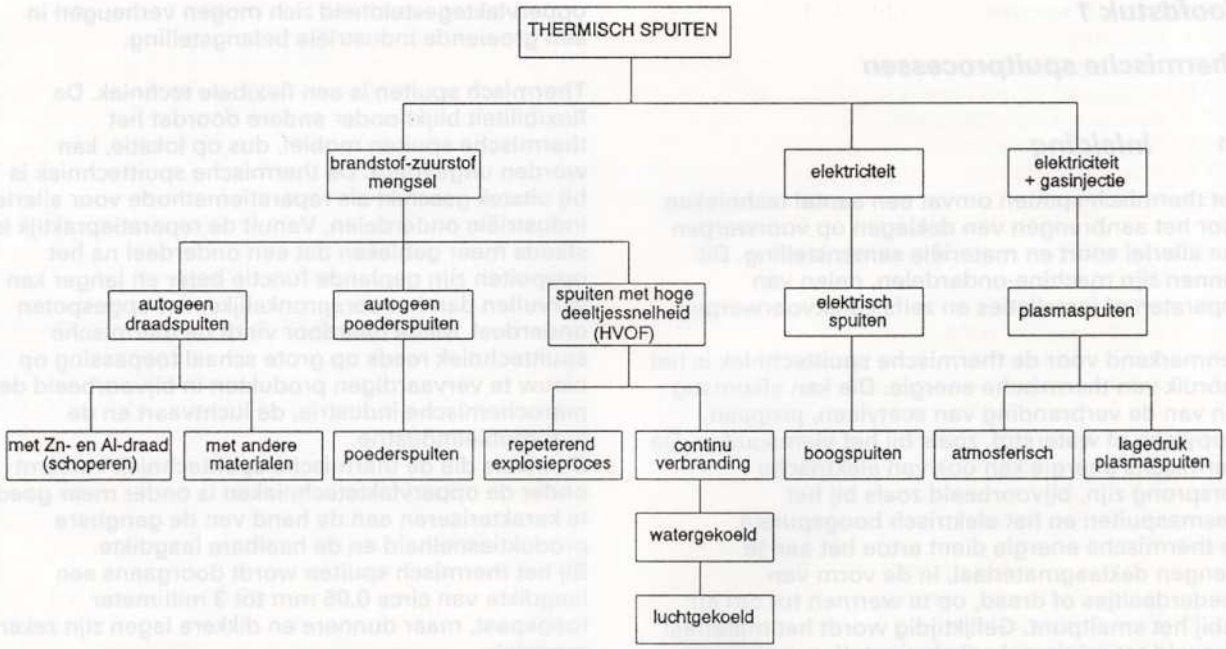
We spreken van thermisch spuiten als wordt uitgegaan van energie die gebruikt wordt om een te verspuiten materiaal, in draad- of poedervorm, om en nabij het smeltpunt te brengen en vervolgens te verstuiven.
Is de thermische energie afkomstig van een brandstof (gas of vloeibaar), dan spreken we van **vlamspuiten**. Is de energie afkomstig van elektrische energie, dan spreken we van **elektrisch spuiten**, en als de energie afkomstig is van elektrische energie met gasinjectie dan spreken we van **plasmaspuiten**.
Een schematische indeling van de thermische spuitprocessen naar energiebron is in figuur 1.1 weergegeven.

1.2.1 Autogeen draadspuiten

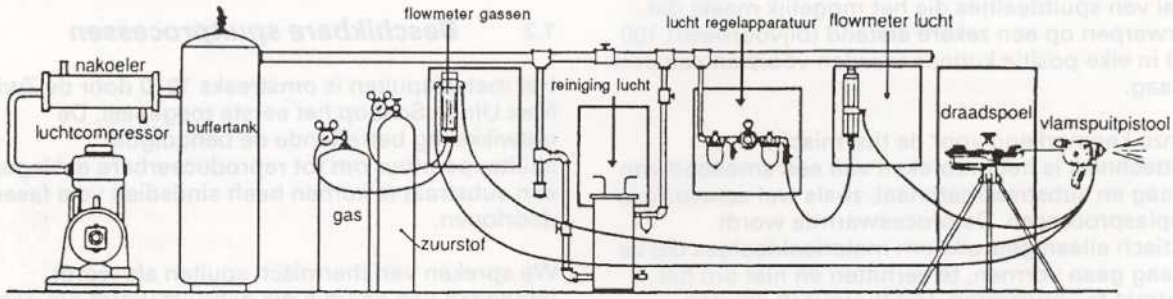
1.2.1.1 *Algemeen*

Autogeen draadspuiten is het oudste proces dat uit de vinding van dr. Schoop is ontwikkeld. Het proces is een eenvoudige en economische deklagentechniek. Door middel van een elektro- of een 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 1.2 is schematisch een autogene draadspuitinstallatie weergegeven.

Kenmerkende laageigenschappen voor het autogeen



figuur 1.1 Indeling van de thermische spuitprocessen



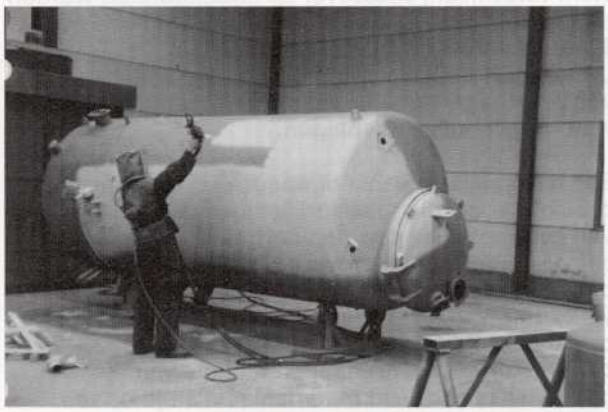
figuur 1.2 Schema van een autogene draadspuitinstallatie

draadspuitproces zijn de typische microporeuze lamellaire structuur van de deklaag met een bepaald percentage oxyde-insluitingen, een matige treksterkte, hoge drukvastheid en een geringe rek. Het specifieke toepassingsgebied van het autogeen draadspuiten ligt bij de corrosiebestrijding, mouldingtechniek, bescherming, opvulling, dikke lagen voor reparatie, verbeteren van loopeigenschappen of wrijvingseigenschappen en het spuiten van witmetaal lagers.

Materialen die door middel van het autogeen draadspuitproces zijn te verspuiten, zijn metalen en legeringen die in draadvorm kunnen worden getrokken en een smeltpunt hebben dat enkele honderden graden onder de temperatuur van de gebruikte warmtebron ligt. Het draadspuitproces is eveneens geschikt voor het verwerken van zogenaamde gevulde draden, van in kunststof- of metalen omhulling gevatte poedervormige materialen en van keramische staven.

1.2.1.2 *Autogeen draadspuiten met Zn- en Al-draad*

Het thermisch spuiten van zink en aluminium draden wordt ook wel "schoperen" genoemd, naar de uitvinder Schoop. Het is een autogeen draadspuitproces speciaal voor het verspuiten van draden voor corrosiebestrijding (een voorbeeld is te zien in figuur 1.3). Materialen die hiervoor in aanmerking komen zijn die, welke een stalen constructie een kathodische bescherming geven, dus die materialen die onedeler zijn dan ijzer.
In de praktijk vinden zink, aluminium en zink-aluminiumlegeringen toepassing. Keuzecriteria voor genoemde materialen zijn de pH-factor en de bedrijfstemperatuur. De globale toepassingsgebieden voor zink en aluminium voor anticorrosiedoeleinden zijn:



figuur 1.3 Schoperen van een mesttank

ZINK (99,9%)	landelijke omgeving	pH 8 -10,5
	zoet water	pH 6,5
	basisch milieu	(water)temperatuur maximaal 60°C
ALUMINIUM (99,5%)	industriële omgeving	pH 3 - 6,5
	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;
- 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.

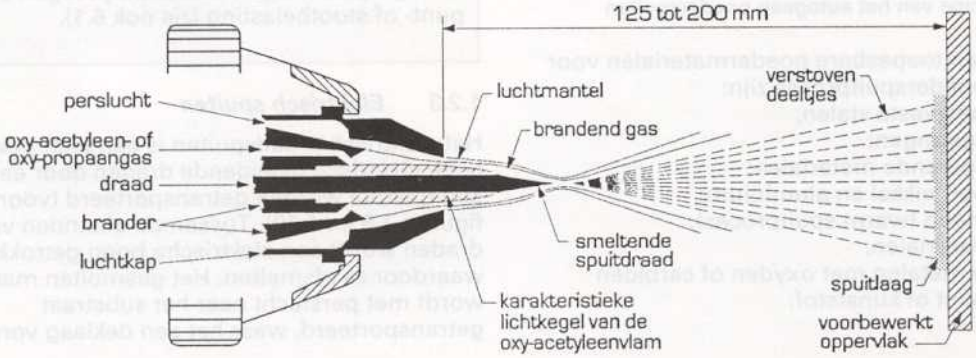
1.2.1.3 *Autogeen draadspuiten met andere materialen (metalliseren)*

Bij dit autogeen draadspuitproces worden materialen verstoven, gewoonlijk met een smeltpunt tussen 800 en 2800°C. Het spuitpistool heeft in vergelijking met een schopeerpistool een lagere draaddoorvoersnelheid, vanwege het hogere smeltpunt van de te verspuiten draad.
Het principe van het autogeen draadspuiten wordt schematisch in figuur 1.4 weergegeven.

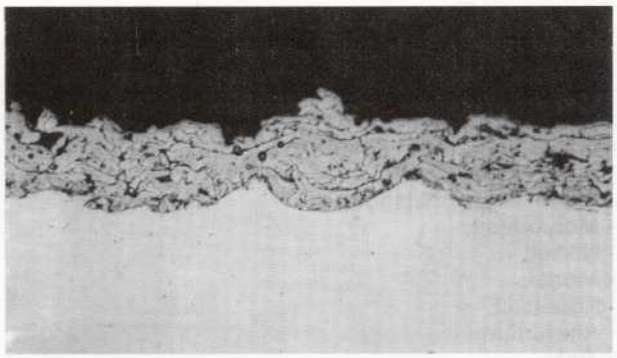
Bij het metalliseren gebruikt men in het algemeen acetyleen met zuurstof vanwege zijn hoge vlamtemperatuur.
Voorbeelden van toepasbare draadmaterialen voor het autogeen draadspuitproces zijn:
- C-staalsoorten;
- Roestvaste staaltypen;
- Koper-tin (brons)soorten;
- Molybdeen;
- Nikkel;
- Monel;
- Koper;
- Aluminium;
- Zink;
- Witmetaal;
- Tin;
- Zinkal 85/15.

Het toepassingsgebied van het metalliseren lag van oudsher in de reparatiesector, maar heeft zich in de loop der jaren ontwikkeld naar produktietoepassingen.
Zo worden er voor de automobielindustrie computergestuurde systemen gebouwd voor het volledig automatisch spuiten van molybdeen op synchroonringen, transmissievorken en zuigerveren (figuur 1.5). In figuur 1.6 is de microstructuur van de draadgespoten molybdeenlaag weergegeven.

figuur 1.5 Zuigerveren, synchroonringen en transmissievorken voorzien van een molybdeenlaag van 0,08 mm



figuur 1.4 Schema van het autogeen draadspuiten



figuur 1.6 Doorsnede van een opgespoten molybdeenlaag

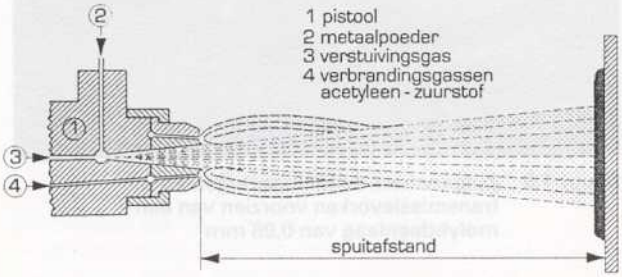
1.2.2 *Autogeen poederspuiten*

1.2.2.1 *Algemeen*

Autogeen poederspuiten is een techniek die omstreeks 1956 in opkomst kwam en in eerste instantie was bedoeld om materialen te kunnen verspuiten die niet in draadvorm geproduceerd kunnen worden; met name waren dit de insmeltlegeringen op nikkel- of kobaltbasis en aanvankelijk ook de keramische materialen, zoals aluminiumoxyde en zirkoonoxyde. Door de ontwikkeling van keramische staven kunnen oxyden ook met draadspuitpistolen worden opgebracht. Vandaag de dag bedraagt het aantal verschillende poedermaterialen een veelvoud van de beschikbare draadsoorten en heeft dit proces het draadspuiten voor een deel overvleugeld.

1.2.2.2 *Standaarduitvoering*

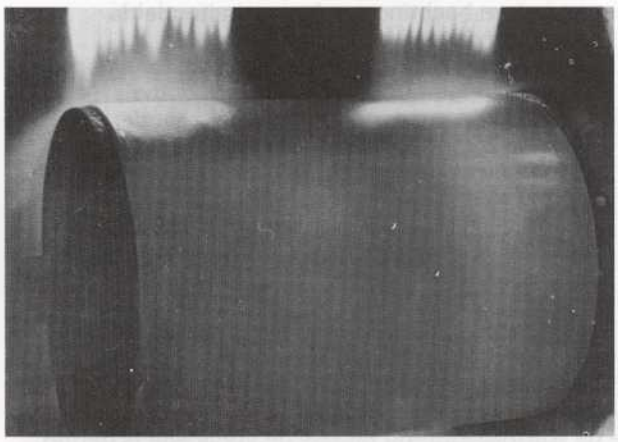
Bij dit proces wordt het spuitmateriaal in poedervorm door middel van een transportgas door het pistool gevoerd en centraal in een brandend gas-zuurstofmengsel (meestal acetyleen-zuurstof) geïnjecteerd, gesmolten en getransporteerd naar het substraat. In figuur 1.7 is het principe van het autogeen poederspuiten weergegeven



figuur 1.7 Principe van het autogeen poederspuiten

Voorbeelden van toepasbare poedermaterialen voor het autogeen poederspuitproces zijn:
- C-stalen en roestvaste stalen;
- Ni en Ni-Cr legeringen;
- exotherm reagerende materialen;
- koper-tin, koper, nikkel en aluminium;
- insmeltlegeringen (warm spuitproces);
- keramische materialen;
- mengsels van metalen met oxyden of carbiden (cermets), grafiet of kunststof;
- kunststoffen.

Autogene poederspuitpistolen zijn compacter en lichter dan alle andere typen van thermische spuitpistolen.
Naast materialen die volgens het koudspuitprincipe worden aangebracht, wordt dit systeem vooral toegepast voor het spuiten van de zogenaamde insmeltlegeringen. Deze materialen bevatten naast nikkel, chroom en/of kobalt al of niet met toevoeging van wolfraamcarbide, 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 een ovenbehandeling. Deze behandeling wordt aangeduid met insmelten of fusen (zie figuur 1.8).



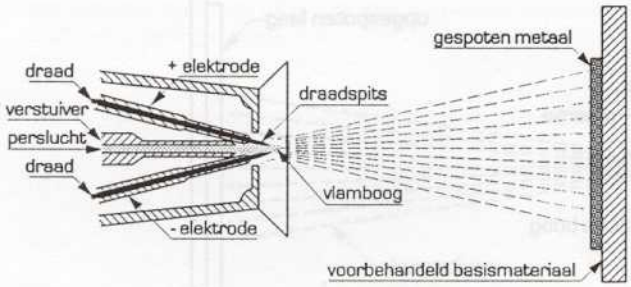
figuur 1.8 Insmelten van een opgespoten laag

Insmelten van opgespoten lagen

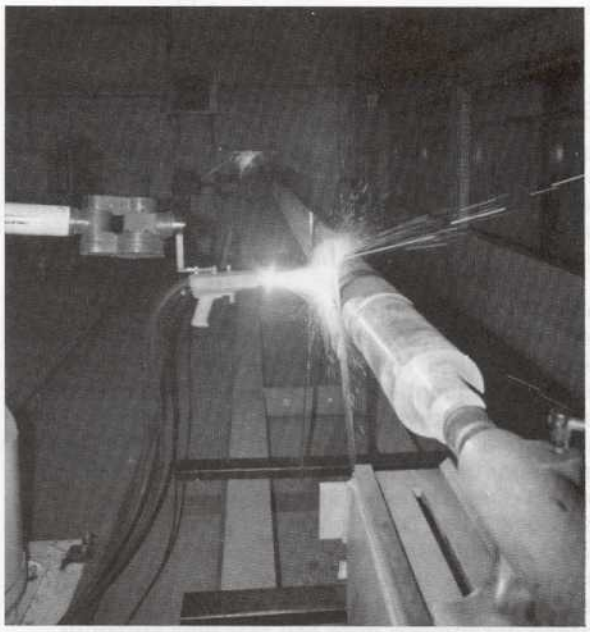
Het doel van het insmelten is een goede hechting (door middel van diffusie) tot stand te brengen tussen de afzonderlijke spuitdeeltjes en tussen de deklaag en het substraat. Het resultaat is een metallurgische verbinding tussen deklaag en substraat met een diffusiezone van enkele tientallen microns.
Tevens bereikt men dat de typische kenmerkende microporeuze lamellaire structuur, zoals bij een koudspuitproces ontstaat, niet meer aanwezig is, zodat deze deklagen homogeen van structuur zijn. Het voordeel van deze zogenaamde warm gespoten deklagen is, dat ze beter dan koudgespoten lagen bestand zijn tegen een lijn-, punt- of stootbelasting (zie ook 6.1).

1.2.3 *Elektrisch spuiten*

Het elektrisch draadspuiten is een techniek waarbij twee elektrisch geleidende draden door een spuitpistool worden getransporteerd (voorbeelden in figuren 1.9 en 1.10). 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.



figuur 1.9 Principe van elektrisch draadspuiten



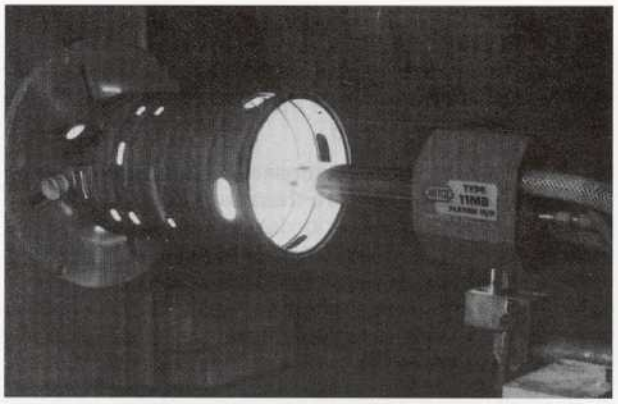
figuur 1.10 Het elektrisch draadspuiten van een schroefas van een fregat van de Koninklijke Marine

Met dit proces kunnen deklagen snel en tegen lage energiekosten worden opgebracht.
Het eerste elektrische spuitpistool werd in 1920 ontwikkeld, echter de ontwikkeling ervan bleef tot na de oorlog liggen, totdat verschillende Oost-Europese landen dit systeem op grote schaal gingen toepassen.
De voordelen van elektrisch draadspuiten zijn de grote spuitcapaciteit en de goede hechting. De apparatuur kan tegen geringe energiekosten opereren, terwijl de mobiliteit van de apparatuur groot is, hetgeen het proces geschikt maakt om op lokatie te werken.

1.2.4 ***Plasmaspuiten***

1.2.4.1 *Algemeen*

Het thermisch spuiten door middel van plasma 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 vlamtemperatuur van dit proces konden worden ontwikkeld. Vooral de ruimtevaart en de vliegtuigmotorenbouw hebben deze ontwikkelingen bevorderd.
In de vijftiger jaren werden plasmapistolen ontwikkeld om materialen met hittebestendige eigenschappen voor de ruimtevaart te verspuiten. In de late jaren '50 en begin '60 werden de eerste serieuze resultaten geboekt bij het vervaardigen van plasmapistolen voor het verspuiten van materialen met een hoog smeltpunt, de zogenaamde refractaire materialen.
Vrijwel elk poedervormig materiaal kan met behulp van het plasmaproces worden verspoten om op nagenoeg elk substraat een deklaag te vormen.
Toepassingen voor het plasmaspuiten zijn er op het gebied van corrosie-, temperatuur- en slijtagebestendige deklagen.
Zo'n honderdvijftig componenten van vliegtuigmotoren worden tegenwoordig door middel van het plasmaspuitproces voorzien van een deklaag (zie bijvoorbeeld figuur 1.11).



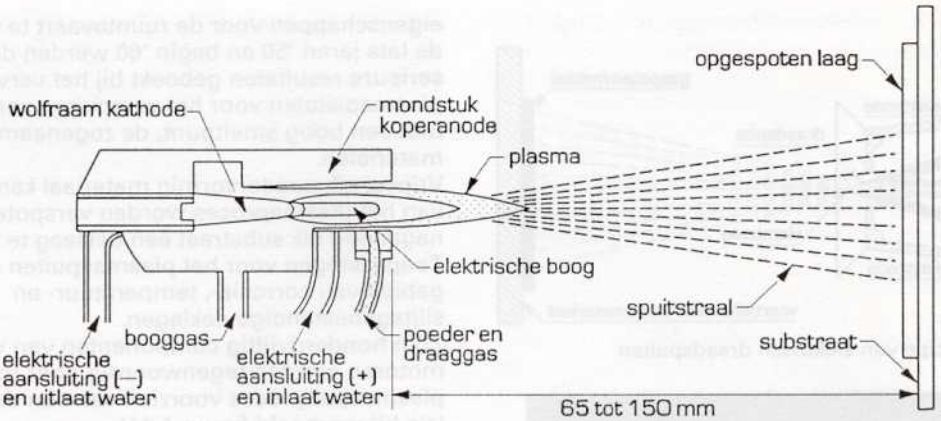
figuur 1.11 Het plasmaspuiten van een verbrandingskamer van een straalturbinemotor

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 lagere druk dan 1 bar plaatsvinden. In dat geval spreekt men van vacuümplasmaspuiten, of beter van lagedruk-plasmaspuiten (LPPS = Low Pressure Plasma Spraying).

1.2.4.2 *Het plasma spuitproces*

Bij de plasma spuitprocessen wordt een boogontlading opgewekt tussen een wolfraam elektrode, de kathode, en een watergekoelde koperen mondstuk, de anode. Figuur 1.12 geeft schematisch een voorstelling weer van het plasmaspuiten.

Het gas om het plasma op te wekken wordt axiaal of radiaal-draaiend toegevoerd aan het plasma spuitpistool. 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.
De temperatuur in het plasma is afhankelijk van de mondstukconfiguratie en van de procesparameters en kan waarden van 20.000°C bereiken. Argon of stikstof, al of niet gemengd met helium of waterstof, worden als gassen toegepast. Het gebruik van tweeatomige gassen resulteert in een hoge energie-inhoud van het plasma.



figuur 1.12 Doorsnede van een plasma spuitpistool

1.3 *Verdere ontwikkelingen van de spuitprocessen*

1.3.1 *Autogeen spuiten met hoge deeltjessnelheid*

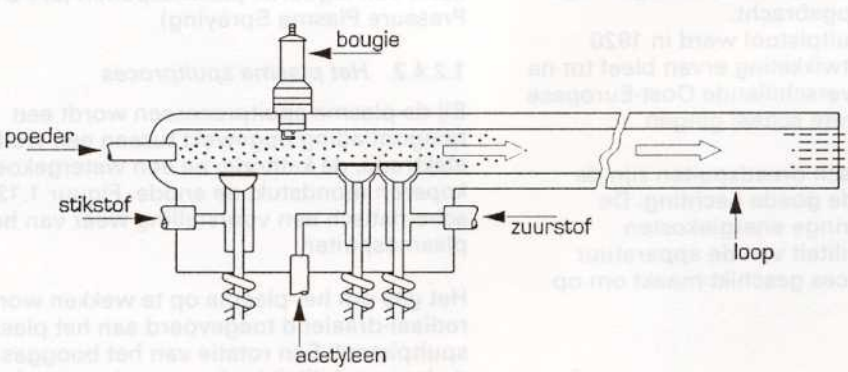
Het spuiten met hoge deeltjessnelheid onderscheidt zich principieel van andere thermische poederspuitprocessen, doordat de deeltjes met een grotere snelheid dan bij het conventionele spuiten naar het werkstuk worden getransporteerd, om aldaar een deklaag op het substraat te vormen met grote dichtheid en goede hechting.
Het principe berust op een gelijktijdige overdracht van thermische en vooral kinetische energie van de spuitdeeltjes naar het substraat.
De hoge snelheidssystemen zijn onder te verdelen in:

a. watergekoeld intermitterend explosie(detonatie)proces;
b. watergekoeld continu verbrandingsproces;
c. luchtgekoeld continu verbrandingsproces.

1.3.2 *Explosieproces*

De in figuur 1.13 schematisch weergegeven spuitinstallatie bestaat uit een watergekoelde pijp met een lengte van circa 1,5 meter en een inwendige diameter van circa 25 mm, waar zich aan één zijde een verbrandingskamer bevindt.

Een mengsel van zuurstof en acetyleen wordt toegevoerd alsmede een hoeveelheid te verspuiten poedermateriaal. Het gehele mengsel wordt met een bepaalde frequentie (circa 6 Hz) elektrisch ontstoken. Het spuitpoeder wordt in de explosieschokgolf verhit en versneld.
Het poeder verlaat de pijp met een snelheid van 800-900 m/sec, terwijl de temperatuur van het gas op circa 3000°C ligt. Door de grote snelheid van de spuitdeeltjes treden microlasverschijnselen op en ontstaat er een deklaag bestaande uit circa 5 microns dikke, elkaar overlappende lamellen. De deklagen worden gekenmerkt door een zeer fijne structuur (figuur 1.14) en een hoge sterkte.



figuur 1.13 Schema van het explosieproces

figuur 1.14 Microstructuur van explosiegespoten WC-17% Co legering

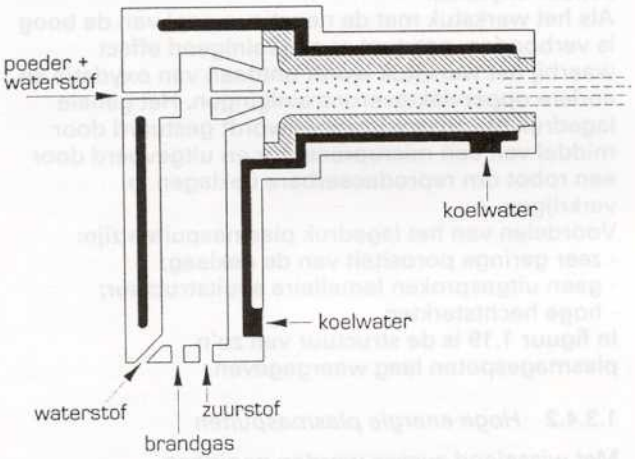
Explosiespuitlagen hebben in het recente verleden aangetoond bestand te zijn tegen extreme corrosie- of slijtage-omstandigheden.

1.3.3 *Hoge snelheidprocessen met continu verbranding (HVOF-processen)*

Bij het hoge snelheidsproces met continu verbranding wordt een gasmengsel onder hoge druk tot ontbranding gebracht, resulterend in grote gassnelheden van 1000 tot 1500 m/sec. Centraal wordt hierin een spuitpoeder geïnjecteerd, opgewarmd, versneld en naar het werkstuk getransporteerd. Dit continu verbrandingsproces kent een watergekoelde uitvoering en een luchtgekoelde uitvoering. HVOF staat voor High Velocity Oxygen Fuel.

1.3.3.1 *Watergekoeld continu verbrandingsproces*

Dit thermische spuitproces is rond 1981 ontwikkeld. Het spuitpistool bestaat uit een watergekoelde loop waarin het spuitpoeder centraal in de continustroom van het verbrandingsgas wordt geïnjecteerd. In figuur 1.15 is het principe van het proces weergegeven.



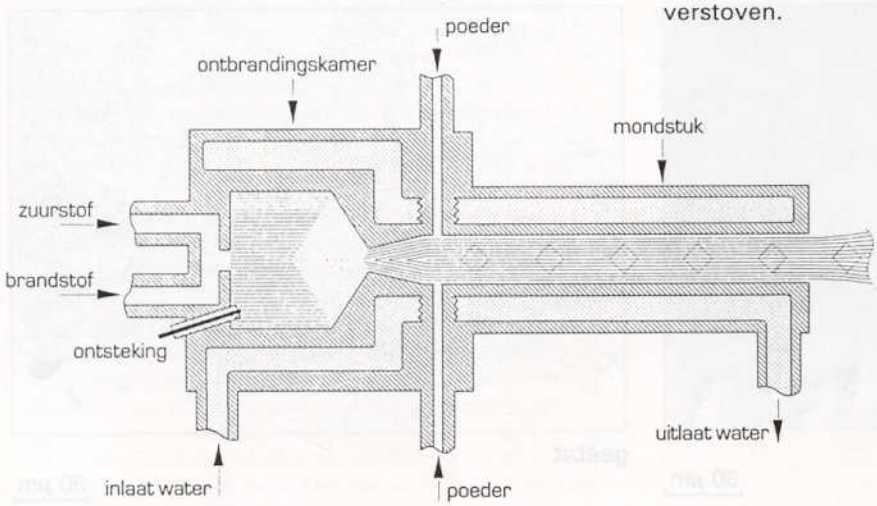
figuur 1.15 Principe van een watergekoeld hoge snelheidsproces

Als brandstof kunnen propaan, propyleen en waterstof worden gebruikt. De verbrandingsgassen bereiken in de circa 150 mm lange nauwe straalpijp een snelheid tot circa 1200 m/s bij een temperatuur tot circa 3000°C.
Bij de botsing van het opspuitpoeder met het werkstukoppervlak treden microlasverschijnselen op. De spuitafstand is veel groter dan bij het explosiespuiten, daar de spuitstraal het werkstuk thermisch zou kunnen beschadigen. Desondanks wordt de werkstuktemperatuur hoger.
Een nadeel van dit watergekoelde hoge snelheidsproces is de kans op waterlekkage die bij de relatief hoge bedrijfstemperatuur tijdens spuiten kan optreden. Bovendien kan na verloop van tijd afzetting van het te verspuiten poedermateriaal in de spuitloop optreden, met als gevolg verstoring van het spuitproces.

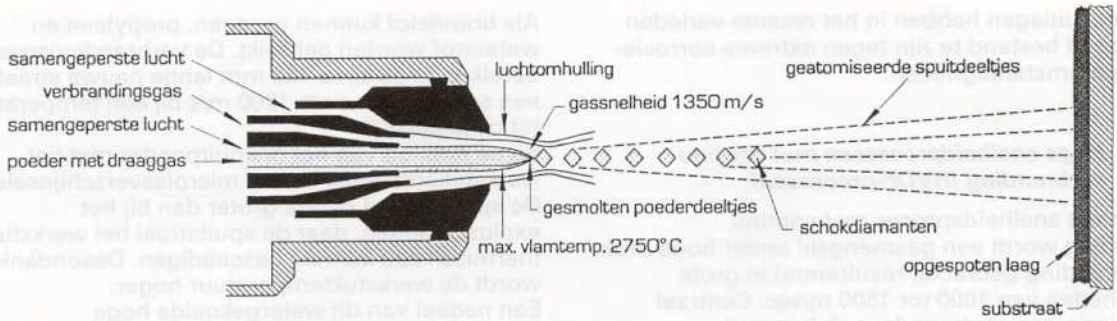
Een recente ontwikkeling is het HP/HVOF (High Pressure/HVOF) proces. Hierbij wordt in plaats van een gas, kerosine gebruikt. Het mengsel van zuurstof en kerosine wordt door middel van een bougie tot ontbranding gebracht. Kenmerken van het proces zijn: een neersmeltsnelheid tot circa 15 kg/uur, gassnelheden tot 3000 m/sec, waarbij deeltjessnelheden optreden tot 1100 m/sec, een depositierendement van ≤70% en het proces is niet zo gevoellig voor de grootte van de poederdeeltjes. Het vormt bijzonder dichte deklagen met hoge sterkte. Overhitting van het substraat is mogelijk, indien de warmte niet voldoende wordt afgevoerd. In figuur 1.16 is het proces schematisch weergegeven.

1.3.3.2 *Luchtgekoeld continu verbrandingsproces*

Dit hoge snelheidssysteem is in 1988 op de markt gebracht. Het proces maakt gebruik van een zuurstof-gasmengsel. Als gas wordt meestal propyleen gebruikt, maar propaan, waterstof of acetyleen kunnen ook worden gebruikt. De gassen worden in een mengkamer gemengd en stromen onder hoge druk uit een brander met een gassnelheid van circa 1500 m/sec. De verbranding van het gas vindt plaats buiten het pistool (zie figuur 1.17). Het brandende gas met een temperatuur van 2700°C vormt een straal waarin het poeder onder druk centraal wordt geïnjecteerd, opgewarmd en met een hoge snelheid van 500-800 m/sec naar het substraat verstoven.



figuur 1.16 Principe van het HP/HVOF proces



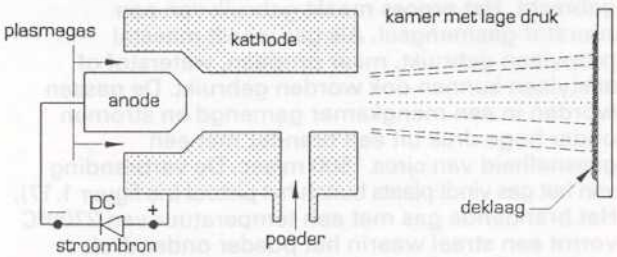
figuur 1.17 Principe van een luchtgekoeld hoge snelheidsspuitproces

Luchtkoeling biedt dit systeem de mogelijkheid om eenvoudig met verlengstukken te werken voor het aanbrengen van deklagen in onder andere boringen. Door het ontbreken van een loop vindt daar geen afzetting van het spuitpoeder plaats, waardoor er geen produktiestagnatie kan optreden.

1.3.4 *Plasmaspuiten*

1.3.4.1 *Lagedruk plasmaspuiten*

Alle thermische spuittoepassingen die bij atmosferische druk worden uitgevoerd, worden beperkt door de structuur van de deklaag. Deze wordt onder andere bepaald door oxydatie van het werkstuk en het deklaagmateriaal.
Bij het lagedruk plasmaspuiten wordt het proces uitgevoerd bij verlaagde druk in een inerte, meestal argon atmosfeer. In dit geval kunnen dan deklagen worden geproduceerd met hoge mechanische kwaliteit en chemische zuiverheid.
In de lagedrukkamer (figuur 1.18), waarbij de druk bij de start van het proces tot 0,2 mbar wordt verlaagd



figuur 1.18 Lagedruk plasmaspuitinstallatie

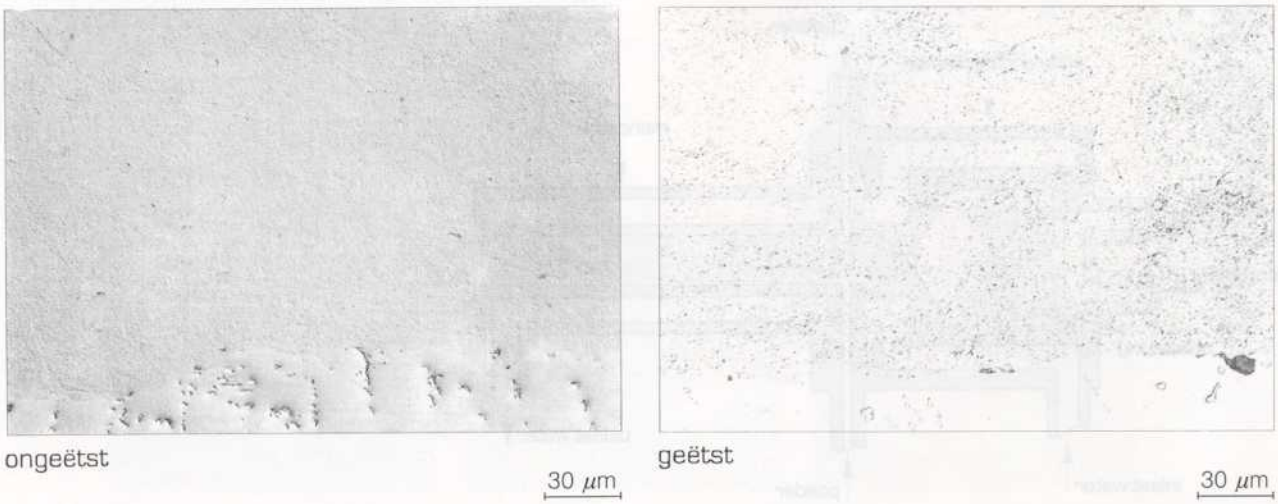
en waarin tijdens het spuiten een inerte argon atmosfeer van circa 40 mbar aanwezig is, worden ongewenste reacties tussen spuitdeeltjes en de omgevingsatmosfeer voorkomen.

Hierdoor biedt het lagedruk plasmaspuiten (LPPS) aanmerkelijke voordelen vergeleken met het conventionele plasmaspuiten. Tevens kan men bij het LPPS een zogenaamde transferred-arc (overgedragen boog) opwekken tussen mondstuk en werkstuk. Het verwarmingseffect van deze boog wordt gelijkmatig over het werkstuk verspreid en geeft hierdoor een intensieve voorverwarming zonder oxydatie.
Als het werkstuk met de negatieve pool van de boog is verbonden, ontstaat er een reinigend effect waarbij het werkstuk wordt ontdaan van oxydatie en andere oppervlakteverontreinigingen. Het gehele lagedruk plasmaspuitproces wordt gestuurd door middel van een microprocessor en uitgevoerd door een robot om reproduceerbare deklagen te verkrijgen.
Voordelen van het lagedruk plasmaspuiten zijn:
- zeer geringe porositeit van de deklaag;
- geen uitgesproken lamellaire spuitstructuur;
- hoge hechtsterkten.

In figuur 1.19 is de structuur van zo'n plasmagespoten laag weergegeven.

1.3.4.2 *Hoge energie plasmaspuiten*

Met wisselend succes worden pogingen ondernomen de kwaliteit van de opgespoten laag te verbeteren. Dat wil zeggen dichtere en beter



figuur 1.19 Structuur LPPS NiCrAlY lagen (Ni-basis, Cr 22%, Al 10%, Y 1%)

hechtende lagen. De ontwikkelaars gaan daarbij uit van twee mogelijkheden of een combinatie van beide, namelijk het verhogen van de deeltjessnelheid en de temperatuur van de te verspuiten materialen. Een graadmeter of een ontwikkeling succes heeft, is het op ruime schaal kunnen commercialiseren van de apparatuur. Hieronder volgt een samenvatting van een aantal van deze ontwikkelingen.

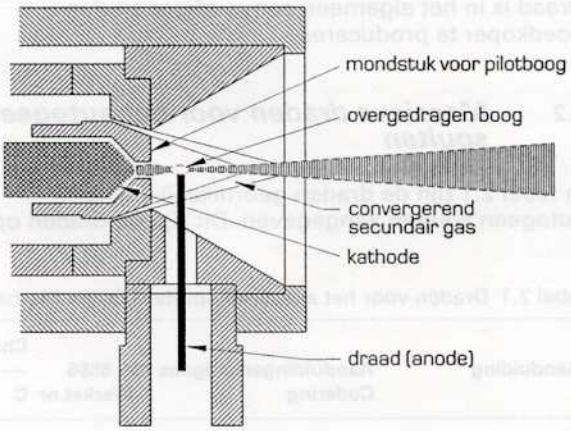
- In navolging van het explosie-proces is in 1970 door Pratt and Whitney, GatorGard ontwikkeld. Een methode om de deeltjes door verhogen van de plasmatemperatuur en de snelheid een grotere energie te geven. Gebruik wordt gemaakt van een standaard plasmapistool met daaraan een watergekoeld verlengstuk. Als plasmagas wordt 100% He gebruikt. De apparatuur wordt nu onder licentie verkocht door Sermatech International, Inc. USA.
  De methode is speciaal bedoeld voor het verspuiten van WC-Co poeder, teneinde het uiteenvallen van de WC-deeltjes te voorkomen. De kwaliteit moet gelijk of beter zijn dan die te bereiken met het explosieproces. Het proces wordt toegepast in de luchtvaart- en de olie-industrie.

- De PlazJet is ook een verlengd plasmapistool, speciaal bedoeld voor het verspuiten van keramische materialen. De wanden van het verlengde mondstuk zijn geïsoleerd van de anode uitgevoerd. De boog bevindt zich tot het eind van het verlengde mondstuk. De booglengte kan daardoor zo'n 100 mm bedragen en de uittreesnelheid van het gas is hoog. De warmte-inhoud van de boog is door de grote booglengte ook hoog. Het poeder wordt aan het eind van het pistool ingevoerd. De industriële toepassing is beperkt. Voor het spuiten van keramische lagen worden depositiehoeveelheden genoemd van 20 kg/uur.

- Een methode om de temperatuur van de te verspuiten deeltjes te verhogen is het axiaal invoeren van het poeder direct in het hart van de plasmaboog. Hier zijn de temperatuur en de gassnelheid het hoogst. Het nadeel is, dat het ingevoerde poeder de boog verstoort en invloed heeft op de boogspanning. De eigenschappen van het plasmagas worden sterk beïnvloed door het type en de hoeveelheid te verspuiten poeder. Apparatuur wordt onder andere door NASA geleverd, maar ontwikkelingen zijn nog steeds gaande. Het succes is beperkt en er is sprake van een lage opbrengst bij het spuiten van keramische poeders.

- In het multi-boog pistool van Electro-Plasma, Inc. zijn drie concentrisch geplaatste kathodes aangebracht. Deze vormen één plasmaboog in de anoderuimte. Een probleem is de stabiliteit van de resulterende boog. Deze wordt verstoord door de geleidbare metaaldamp van het spuitpoeder.
  De ontwikkeling richt zich nu op het onder andere aanbrengen van een watergekoelde poeder- of draadintrede, waardoor opspuitmateriaal een stukje voor de plasmaboog kan worden ingevoerd.
  De ontwikkeling is nu in handen van Flame Spray Industries, Inc., USA.

- Van dezelfde firma is de ontwikkeling van een plasmapistool waarmee een stroomvoerende draad als anode wordt geschakeld. De draad is voor het mondstuk en loodrecht op de uittredende boog gericht. In figuur 1.20 is een principe weergegeven. Deklagen moeten een hoge dichtheid, minder dan 8% porositeit, en een goede hechtsterkte hebben. De mogelijkheid is aanwezig een tweede toevoerbuis voor poeder te realiseren die ook loodrecht op de boog staat. Hierdoor kan een metaal-matrix composiet worden verkregen. Een opbrengst van 9 kg nikkel- of kobaltbasis spuitmateriaal kan bij een vermogen van 12 kW worden gerealiseerd. Dit is een beduidend lager vermogen dan bij een standaard plasmatechniek, waar dan een vermogen van 40 tot 80 kW voor nodig is.



figuur 1.20 Principe plasmaspuiten met draad

Hoofdstuk 2

Opspuitmaterialen

2.1 *Algemeen*

Deklaagmaterialen komen voor in poeder- en in draadvorm. In het algemeen bepalen de functionele eisen die voortvloeien uit de bedrijfsomstandigheden, de keuze van het te gebruiken materiaal en het daarbijbehorende spuitproces. De keuzecriteria zijn niet altijd eenduidig. Voor sommige toepassingen is zowel poedervormig als draadvormig uitgangsmateriaal geschikt. De uiteindelijke keuze wordt dan bepaald door andere criteria, zoals beschikbaarheid van procesapparatuur of economische overwegingen. Draad is in het algemeen eenvoudiger en dus goedkoper te produceren.

2.2 *Massieve draden voor het autogeen spuiten*

In tabel 2.1 zijn de draden gebruikelijk bij het autogeen spuiten aangegeven. Dit zijn de draden op Fe- en één op Mo-basis. In tabel 2.2 zijn de draden vermeld van de non-ferro spuitmaterialen.

2.2.1 *Toelichting bij de aanduidingen van draden en staven*

Het blijkt dat, behalve in de Bondsrepubliek Duitsland, draden en poeders verder niet zijn genormaliseerd. Gebruikers volstaan met het gebruik van codes van hun leverancier. In een voorlichtingspublikatie moet het gebruik van merknamen worden vermeden en is in de meeste gevallen niet toelaatbaar. Een uitzondering is bijvoorbeeld het noemen van de naam van een fabrikant.
De Duitse codering wordt in Nederland weinig gebruikt, maar toch dient enige ordening te worden aangebracht. In de tabellen, die voor een deel ontleend zijn aan DIN 8566, zullen behalve de Duitse aanduidingen ook de in deze publikatie gehanteerde codering worden aangehouden. Op deze manier zijn de spuitmaterialen eenduidig vast te stellen. Daarbij is het volgende systeem aangehouden:

1. De metalen of de legeringen worden aangeduid met hun chemische symbolen.
2. Eerst wordt het hoofdelement genoemd met daarachter een streepje.
3. Daarna de voornaamste elementen, met een

tabel 2.1 Draden voor het autogeen spuiten, Fe- en Mo-basis

Aanduiding	Aanduidingen volgens DIN 8566		Chemische samenstelling in %						
	Codering	Werkst.nr	C	Cr	Ni	Mo	Fe	Mn	Si
Fe-Cr 13	Sd-X 40 Cr13	1.4034	0,4-0,5	12-14	-	-	Rest	≤ 1,0	≤ 1,0
Fe-CrNi Mn 19-9,5	Sd-X 5 CrNi 19 9	1.4302	≤ 0,06	18-20	8,5-10,5	-	Rest	≤ 2,0	≤ 1,5
Fe-CrNiMo 19-11,5	Sd-X 5 CrNiMoNb 19 12	1.4576	≤ 0,07	18-20	10-13	2,4-3,1	Rest	≤ 2,0	≤ 1,5
Fe-CrMnNiSi 18-8,5	Sd-X 5 CrNiMn 18 8	1.4370	0,15	18,0	5,0	-	Rest	8,5	1,0
Fe-MnC	Sd-USD 7	1.0323	0,04-0,12	≤ 0,15	-	-	Rest	0,42-0,68	-
Fe-CMn 0,35	Sd-Ck 35	1.1181	0,30-0,41	-	-	-	Rest	0,46-0,84	0,12-0,38
Fe-CMn 0,85	Sd-D 85-2	1.0616	0,76-0,93				Rest	0,26-0,74	0,07-0,33
Fe-NiMnCrMo 4-2	Sd-3 NiMoCr 12 20	1.6785	0,04	0,5-1,5	3-4	1-3	Rest	≤ 2,0	-
Mo 99,9	Sd-Mo	2.6100	-	-	-	99,95	-	-	-

tabel 2.2 Draden voor het autogeen spuiten, non-ferro materialen

Aanduiding	Aanduiding volgens DIN 8566	Chemische samenstelling in %									
		Ni	Al	Cr	Si	Sb	Sn	Zn	Cu	Fe	Co
Ni-CoFe 1		Rest	-		0,15	-	-	-	0,25	0,6	1,0
Ni-Al 20		Rest	20,0		-	-	-	-	-	-	-
Ni-AlFeCr 20-20		Rest	20,0	4,0		-	-	-	-	20,0	-
Ni-FeCrSi 22-16		Rest	-	16,0	1,5	-	-	-	-	22	-
Ni-CuFe 28-1,5		Rest	0,1	-	0,1	-	-	-	28	1,5	-
Al 99,0		-	99,9	-	-	-	-	-	-	-	-
Al-Si 6			94	-	6	-	-	-	-	-	-
Cu 99,8		-	-	-	-	-	-	-	99,8	-	-
Cu-Zn 34								34	Rest	-	-
Cu-ZnSnFe 40-0,8		-	-	-	-	-	0,8	40	Rest	0,75	-
	Sd-CuAl 8	Mn: 0-0,8	7,5-9,5	-	0,2	-	-	-	Rest	0,5	-
Cu-ZnAg 32-30		Ag: 30	-	-	-	-	-	32	Rest	-	-
Cu-AlFe 9-1		-	9,0	-	-	-	-	-	Rest	1,0	-
Sn 99,8		-	-	-	-	-	99,8	-	-	-	-
Sn-SbCu 7,5-3,5	Sd-LgSn 89	-	-	-	-	7,5	Rest	-	3,5	-	-
Sn-Zn 30		-	-	-	-	-	Rest	30	-	-	-
Zn 99,9		-	-	-	-	-	-	99,9	-	-	-
Zn-Al 15		-	15	-	-	-	-	Rest	-	-	-

maximum van vier.

4. Van het eerste en het tweede meest voorkomende element na het hoofdelement worden de gemiddelde percentages weergegeven.

Voorbeeld: Ni-AlFeCr 20-20, is een type met Ni als hoofdelement, 20% Al en 20% Fe en verder nog Cr.

2.2.2 *Massieve draden voor het elektrisch spuiten*

Deze zijn in de tabellen 2.3 en 2.4 nader aangegeven. Het is in principe mogelijk een combinatie van twee verschillende soorten draden te verspuiten. Hierdoor kan een zogenaamde pseudo-legering worden verkregen.

2.2.3 *Gevulde draden voor het autogeen en elektrisch spuiten*

Met draadspuitpistolen kunnen op deze manier materialen worden gespoten die anders alleen maar in poeder- of in staafvorm zijn te verwerken. In tabel 2.5 en 2.6 zijn respectievelijk de draden op basis van metaaloxyden en composietdraden weergegeven.

2.2.4 *Staven voor het autogeen spuiten*

Voor het autogeen spuiten van keramische materialen kunnen deze ook in staafvorm worden toegepast. De kwaliteit van dergelijke lagen is uitstekend, echter minder dan die zijn plasmagespoten, maar wel weer beter dan lagen die met het autogeen poederspuiten zijn vervaardigd. In tabel 2.7 zijn de typen staven aangegeven die in DIN 8566 zijn genormaliseerd.

tabel 2.3 Draden voor het elektrisch spuiten, Fe- en Mo-basis

Aanduiding	Aanduidingen volgens DIN 8566		Chemische samenstelling in %					
	Codering	Werkst.nr.	C	Cr	Ni	Mo	Fe	Mn	Si
Fe-Cr 13	LSd-X 40 Cr13	1.4034	0,4-0,5	12-14	-	-	Rest	≤ 1,0	≤ 1,0
Fe-CrNi Mn 19-9,5	LSd-X 5 CrNi 19 9	1.4302	≤ 0,06	18-20	8,5-10,5	-	Rest	≤ 2,0	≤ 1,5
Fe-CNirMo 19-11,5	LSd-X 5 CrNiMoNb 19 12	1.4576	≤ 0,07	18-20	10-13	2,4-3,1	Rest	≤ 2,0	≤ 1,5
Fe-Mn			0,23	-	-	-	Rest	0,5	0,1
Fe-MnCrC 2-2			1,10	1,90	-	-	Rest	2,0	0,40
Mo 99,9	LSd-Mo	2.6100	-	-	-	99,95	-	-	-

tabel 2.4 Draden voor het elektrisch spuiten, non-ferro materialen

Aanduiding	Aanduiding volgens DIN 8566	Chemische samenstelling in %									
		Ni	Al	Fe	Si	Sb	Sn	Zn	Cu	Cr	Mn
Ni-FeCr 25-15		Rest	-	25	-	-	-	-	-	15	-
	LSd-NiCu 30 Mn	Rest	0,5	1,0-2,5	1,0				27-35	-	1-4
Al 99,0		-	99,9	-	-	-	-	-	-	-	-
Cu 99,8		-	-	-	-	-	-	-	99,8	-	
	LSd-CuAl 8 Fe	-	6,5-9,0	1,5-3,5	0,2	-	-	-	Rest	-	0-0,8
Cu-AlFe 9-1		-	9,0	1,0	-	-	-	-	Rest	-	-
	LSd-LgSn 89	-	0,05	0,1	-	7-8	Rest	-	3-4	-	-
Sn-SbCu 7,5-3,5		-	-	-	-	7,5	Rest	-	3,5	-	-
Zn 99,9		-	-	-	-	-	-	99,9	-	-	-

tabel 2.5 Gevulde draden met metaaloxyden

Type vuldraad	Aanduiding volgens DIN 8566	Chemische samenstelling in %						
		Al_2O_3	Cr_2O_3	ZrO_2	CaO	TiO_2	SiO_2	Fe_2O_3
Al_2O_3-TiO_2 94-3	SFd-K 2	≥ 94	-	-	-	≤ 3,5	≤ 2,0	-
ZrO_2-CaO 80-6	SFd-K 5.2	≤ 6,6	-	≥ 80	≤ 6,0	-	≤ 6,0	≤ 0,6
Cr_2O_3-SiO_2 88-6	SFd-K 6.3	≤ 3,5	≥ 88	-	-	-	≤ 6,5	≤ 0,3

tabel 2.6 Gevulde composietdraden

Type vuldraad	Aanduiding volgens DIN 8566	Chemische samenstelling in %								
		C	Ni	Cr	Co	W	Fe	B	Si	Al
Ni-CrSi 72-16	SFd-A 4.2	0,9	70-72	16,5	-	-	3,75	3,25	4,25	-
Co-CrNi 55-19	SFd-BC 6	1,0	≤ 13	≤ 19	≥ 55	8,0		1,5	2,5	-
Ni-Al 70-30	SFd-D 2	-	68-70	-	-	-	-	-	0,5	28-30

tabel 2.7 Keramische staven voor het autogeen spuiten

Type staaf	Aanduidingen volgens DIN 8566	Chemische samenstelling in %						
		Al_2O_3	Cr_2O_3	ZrO_2	MgO	CaO	TiO_2	SiO_2
Al_2O_3	SSt-K 1.2	≥ 97	-	-	-	-	≤ 2	
Al_2O_3-TiO_2	SSt-K 2.1	≥ 96	-	-	-	-	≤ 1,5	≤ 1,3
ZrO_2-CaO	SSt-K 5.3	≤ 0,75	-	≥ 90	-	≤ 6	≤ 0,4	≤ 2
Cr_2O_3	SSt-K 6.4	≤ 8,5	≥ 82	-	≤ 2,5	-	≤ 1	≤ 5
Al_2O_3-MgO	SSt-K 9.1	≥ 70	-	-	≤ 27	< 0,5	-	< 1,7

2.3 *Toepassing van draadvormige opspuitmaterialen*

De specifieke eigenschappen van een deklaag zullen ten opzichte van die van het oorspronkelijke spuitmateriaal in meer of mindere mate verschillen door de inwerking van het spuitproces. Speciaal bij draadvormige uitgangsmaterialen is het van belang om de gewenste specifieke mechanische en fysische eigenschappen van de deklaag goed te overwegen om te komen tot een juiste keuze van het draadvormige uitgangsmateriaal.
Om draadmaterialen succesvol te kunnen verspuiten, is niet alleen de samensteling belangrijk, maar ook de diametertoleranties, afwerking en wikkelnauwkeurigheid van de draad.

In tabel 2.8 zijn richtwaarden van een aantal fysische en mechanische eigenschappen van opspuitmaterialen weergegeven.

2.3.1 *Hechtmaterialen*

Toepasbare hechtmaterialen zijn nikkel-aluminium composieten, molybdeen en andere legeringen die een metallurgische interactie met het substraat tijdens het verspuiten ondergaan.

2.3.1.1 *Nikkel-aluminiumcomposiet*

Dit materiaal wordt gebruikt vanwege zijn hoge temperatuurbestendigheid en algemene toepasbaarheid op verschillende substraten. Nikkel en aluminium veroorzaken tijdens het spuiten een reactie waardoor warmte vrijkomt (exotherme reactie), resulterend in een hoge deeltjestemperatuur en daardoor een goed hechtende nikkel-aluminide laag.

2.3.1.2 *Molybdeen*

Molybdeen in draadvorm wordt gebruikt als hechtmateriaal (zie ook onder 2.3.4.8)

2.3.2 *Staal*

De koolstofstaalsoorten zijn te onderscheiden naar het opklimmende percentage koolstof en legeringselementen. Bij hogere C-percentages kunnen hardere en in het algemeen meer slijtbestendige lagen worden verwacht.

tabel 2.8 Eigenschappen van enkele typen metaaldraden

Type opspuitdraad	Hardheid* Rockwell	Hardheid* Brinell 30	Hechtsterkte in N/mm² **	Porositeit in %	Soortelijke massa in kg/dm³	Smelttemperatuur in °C
Ni-Al 20			32		7,0	
Fe-MnC	B 97		41	7,5	6,4	1200-1500
Fe-CMn 0,85	C 40		56	6	6,4	1200-1500
Fe-NiMnCrMo 4-2	Voor nadere bijzonderheden, zie tekst					
Fe-Cr 13	C 36	300-340	43	5-14	6,6	1410-1510
Fe-CrNiMn 19-9,5	B 80		61		6,9	1410-1510
Fe-CrNiMo 19-11,5	B 74	250			6,9	1410
Fe-CrMnNiSi 18-8,5	B 95	250	44	6,5-14	6,9	1410-1510
Al 99,0	H 38	20-40	40	7,5	2,1	658
Zn 99,9	H 22	30-38	19	5	5,8	
Ni-CuFe 28-1,5		160-200				
Sn-SbCu 7,5-3,5	H 42		19	4	6,1	254-420
Cu-AlFe 9-1	B 50	160-180	46	10,5	6,1	880-1037
Mo 99,9		H_v 600				2617
Cu 99,8	B 23		15-28	8	6,8	1083
Sn 99,8	H 10					232

* = De waarden zijn uit verschillende bronnen en kunnen daarom van elkaar afwijken
** = Dit zijn minimum richtwaarden

2.3.2.1 *Fe-MnC*

Een koolstofstaal met een koolstofgehalte van circa 0,25% en een hardheid van 97 HR_B. Het materiaal is goed te verspanen en heeft een goede weerstand tegen slijtage.

2.3.2.2 *Fe-CMn 0,85*

Een koolstofstaal met een koolstofgehalte van 0,8% en een hardheid van 38 HR_C. Het oppervlak kan alleen door slijpen worden nabewerkt. Het materiaal heeft een geringe krimp en een zeer hoge slijtagebestendigheid.

2.3.2.3 *Fe-NiMnCrMo 4-2*

Dit draadspuitmateriaal combineert een hoge hardheid met een zeer kleine krimp en goede machinale bewerkbaarheid. Vanwege zijn geringe krimp kunnen dikke lagen zonder gevaar voor scheurvorming worden opgebouwd. Het materiaal is door zijn genoemde eigenschappen bijzonder geschikt voor het spuiten van boringen en het produceren van dikke harde slijtvaste lagen.

2.3.3 ***Roestvast staal***

Deze draadmaterialen onderscheiden zich hoofdzakelijk door hun verschillende verhoudingspercentages van chroom en nikkel. Voor de mechanische eigenschappen en de samenstelling zie tabel 2.1

2.3.3.1 *Fe-Cr 13*

Dit is chroomstaal met een redelijke corrosiebestendigheid, een goede slijtageweerstand en algemene toepasbaarheid op veelsoortige werkstukken. Het gespoten materiaal bestaat uit roestvaste staallagen waarvan de eigenschappen overeenkomen met die van het geharde type AISI 410.
Dit spuitmateriaal vindt economisch toepassing bij het produceren van harde slijtvaste lagen op omvangrijke werkstukken of bij het aanbrengen van grote laagdikten bijvoorbeeld op schroefassen, transportrollen, walsen en hydraulische plunjers. Ook wordt dit spuitmateriaal toegepast als opvullaag onder spuitlagen met een grote krimpfactor.

2.3.3.2 *Fe-NiCrMn 19-9,5 (AISI 304)*

Dit is een austenitisch roestvast staaltype met een laag koolstofpercentage. Het bezit goede resistentie tegen corrosie en heeft een redelijk goede slijtageweerstand. De bewerkbaarheid door middel van draaien is goed.
Toepassingen van dit austenitisch roestvast staal zijn bijvoorbeeld het aanbrengen van lagen op pompplunjers, sealringen en glandafdichtingen.

2.3.3.3 *Fe-NiCrMo 19-11,5 (AISI 316)*

Dit is austenitisch roestvast staal met een betere corrosievastheid dan het type Fe-NiCrMn 19-9,5. Ook is het materiaal beter bestand tegen hoge temperaturen. De hoogst toegepaste bedrijfstemperatuur is circa 650°C. Het materiaal heeft een hardheid van HR_B 74 en is goed door middel van draaien na te bewerken.

2.3.3.4 *Fe-CrMnNiSi 18-8,5 (AISI 201)*

Dit is austenitisch roestvast staal met een laag koolstofgehalte en met gelijke corrosiewerende eigenschappen als AISI 304. Met betrekking tot de machinale bewerkbaarheid gedraagt dit materiaal zich echter beter. Voor het aanbrengen van een roestvast-deklaagmateriaal in bijvoorbeeld boringen wordt dit materiaal toegepast vanwege zijn lage krimpfactor.

2.3.4 ***Non-ferro metalen***

- **Anti-corrosie toepassingen**

De non-ferro metalen worden voor verschillende doeleinden opgespoten. Een aantal heeft tot doel het onderliggende metaal tegen corrosie te beschermen. Dit zijn bijvoorbeeld aluminium, zink, een combinatie van beide, monel en nikkel.
Het oxyderen, corroderen of roesten van ijzer en staal wordt veroorzaakt door de inwerking van zuurstof en vocht en wordt versneld door verontreinigen in lucht en water, zoals zout, chloor-, stikstof- en zwavelverbindingen uit rook en uitlaatgassen.
Uit de praktijk is gebleken dat vlamgespoten zink- en aluminiumlagen een zeer langdurige bescherming geven tegen corrosie en dat de onderhoudskosten aanzienlijk lager zijn dan die van verflagen, die periodiek moeten worden gecontroleerd en bijgewerkt.
De levensduur van gespoten metaallagen hangt af van de laagdikte en berust op het galvanische principe dat zink en aluminium kathodische bescherming geven aan het onderliggende ijzer. Dit houdt in dat jaarlijks een geringe hoeveelheid spuitlaag wordt opgeofferd. Een verflaag over de spuitlaag voorkomt of vertraagt deze opoffering en verlengt de totale levensduur aanzienlijk.
Praktische voorbeelden van onderhoudsvrije spuitlagen over een periode van 10-20 jaar zijn geen uitzondering.
Vlamgespoten lagen bieden door de typische oppervlaktestructuur een uitstekend hechtende ondergrond voor eventueel later aan te brengen sealers of kleurverven.

2.3.4.1 *Aluminium (Al 99,0)*

Zuiver aluminium spuitdraad is geschikt voor het autogeen en elektrisch spuitproces. Het wordt veel gebruikt om staal te beschermen tegen elektrolytische, hoge temperatuur- en atmosferische corrosie.
Aluminium ligt in de spanningsreeks lager dan zink, met ander woorden, het is edeler dan zink maar onedeler dan ijzer en wordt derhalve toegepast indien de pH-waarde lager is dan 6. Bovendien geeft aluminium uitstekende bescherming tegen een maritieme atmosfeer. Daarnaast heeft het een goede warmtegeleiding en hoge ductiliteit.
Voor het herstellen van aluminium machinedelen wordt dit aluminium gebruikt met hieraan toegevoegd 12% silicium, waardoor een eutectische legering met lage krimp ontstaat. Dit geeft een hogere slijtvastheid en een strakkere finish bij de nabewerking. Vanwege zijn goede warmtegeleiding wordt het materiaal onder

andere toegepast voor het aanbrengen van een aluminium bodem onder roestvaststalen pannen.

2.3.4.2 *Zink (Zn 99,9)*

Vanaf de eerste ontwikkeling van het spuitproces in 1910 en voortgaande op de grote ervaring die er is op het gebied van kathodische bescherming door galvanisch of thermisch verzinken, is het zinkspuiten, ook wel schoperen genoemd, een zeer efficiënte en goede beschermingsmethode. In neutrale of basische milieus (pH ≥ 7) is zink 99,9 toe te passen, aangezien dan een passiveringslaag kan ontstaan. Bij een lagere pH is dat niet mogelijk.
De beperkingen van zinkspuitlagen liggen in de hogere bedrijfstemperaturen, alsmede in de chemische invloeden vanuit de atmosfeer (bijvoorbeeld zwavelige rookgassen) en de contactvloeistof (bijvoorbeeld verontreinigd water) welke een toelaatbare pH-waarde van minimaal 6 mag hebben. Voor pH-waarden van circa 4 tot 6 moet aluminium of Zn-Al 15 worden toegepast.
Zinkspuitdraad vindt toepassing als roestwerende laag op staalconstructies, jachten, stalen ramen, steigers en als elektrisch geleidende en te solderen laag op condensatoren, isolatoren, glas, papier en plastics. Gespoten zink wordt tevens gebruikt bij de vervaardiging van mallen, speciaal voor kleine series (moulding techniek).

2.3.4.3 *Zn-Al 15*

Dit is een speciaal ontwikkelde legering van zink en aluminium voor het spuiten van uitstekend corrosiewerende lagen, die de voordelen bezitten van zowel zink- als aluminiumlagen.
De zinkrijke fase van de spuitlaag geeft een actieve kathodische bescherming aan staal, terwijl de aluminiumrijke fase een meer passieve afscherming biedt tegen een chemische/corrosieve industrie-atmosfeer. Tevens geven de aluminiumrijke spuitlagen betere mechanische eigenschappen en een grotere hechtsterkte dan de zuivere zinkspuitlagen.
Zn-Al 15 heeft dus een ruimer toepassingsgebied dan zink, vooral in industriële omstandigheden. Een ander praktisch voordeel is, dat het materiaal belangrijk minder stof- en reukoverlast en een hoger spuitrendement geeft dan zuiver zink. Het vindt toepassing als corrosiewerende laag op staalconstructies, bruggen, sluisdeuren, tanks, trafokasten, hekken, enz.

2.3.4.4 *Ni-CuFe 28-1,5 (Monel)*

Dit is een nikkel-koperlegering met goede weerstand tegen zeewatercorrosie. Het is een materiaal dat zich bijzonder goed laat verspuiten en glad kan worden afgewerkt.

2.3.4.5 *Nikkel*

Nikkel wordt vooral toegepast als weerstand tegen corrosie, zowel bij lage als bij hoge temperatuur.

- **Toepassingen bij slijtage**

Opspuitmaterialen als Cu-AlFe 9-1, Sn-SbCu 7,5-3,5 en Mo 99,9 worden gebruikt voor lagertoepassingen.

2.3.4.6 *Sn-SbCu 7,5-3,5 (witmetaal)*

Het spuiten van Sn-SbCu 7,5-3,5 heeft de volgende voordelen ten opzichte van het conventionele ingieten:

- Het werkstuk behoeft niet te worden vertind. Een optimale hechting wordt verkregen op gietijzer, staal, brons of op bestaande witmetaallagen.
- Er zijn geen zwaluwstaarten of speciale ankerkamers nodig. De laagdikte kan veelal tot een minimum worden teruggevoerd. Waar dikke lagen nodig zijn, kan een onderlaag van brons worden gespoten voor een betere warmte-afvoer en als noodlagervlak.
- De spuittemperatuur blijft onder 120°C zodat geen vervorming van het basismateriaal kan plaatsvinden.
- Het materiaal heeft een zeer gelijkmatige structuur en verdeling van de antimoonkristallen. Er zijn geen insluitingen of gietgallen, waardoor een constante hoge slijt- en drukvastheid wordt verkregen.
- Het voorbewerken en spuiten van lagerschalen gaat snel.

2.3.4.7 *Cu-AlFe 9-1 (aluminiumbrons)*

Cu-AlFe 9-1 is een spuitmateriaal waarmee slijtvaste en zeewaterbestendige lagen kunnen worden geproduceerd. Deze spuitlagen bezitten uitstekende loopeigenschappen, overeenkomend met die van sinterbrons. Zij combineren de voor een lagermateriaal benodigde ductiliteit met een relatief hoge hardheid en slijtvastheid die vergelijkbaar zijn met gespoten roestvast staal.
De hoge drukvastheid en sterkte van de laag maken dit materiaal bijzonder geschikt voor zwaar belaste lagervlakken en de loopvlakken van schroefassen. Spuitlagen van Cu-AlFe 9-1 kunnen tot een zeer gladde en strakke finish worden nagedraaid.
Het vindt toepassing bij het preventief bekleden van stalen assen, plunjers, rollen, bussen en ringen met een bronslaag ter vervanging van massief bronzen onderdelen en voor het herstellen van ingesleten bronzen pompwaaiers, schroefassen, geleidebussen, lagerschalen, geleidebanen en glasgoten.

2.3.4.8 *Molybdeen (Mo 99,9)*

In gespoten toestand verkrijgt men een harde microporeuze spuitlaag met bijzonder goede loopeigenschappen tengevolge van zijn lage wrijvingscoëfficiënt. Door de relatief grote porositeit, die overigens beïnvloedbaar is door variatie van procesparameters, heeft deze laag daarnaast het vermogen om smeerolie te absorberen. Hierdoor zijn deze lagen bijzonder geschikt voor zwaarbelaste lagervlakken of belastingsomstandigheden met slechte smering.
Op grote schaal wordt molybdeen in produktie gespoten op onderdelen in de automobielindustrie, zoals zuigerveren en synchroonringen ter verbetering van de slijtvastheid en loopeigenschappen.

Oxydische films in de gespoten molybdeenlaag onderbreken het metallisch contact van twee loopvlakken, waardoor "vreet"verschijnselen worden onderdrukt.

- **Diverse toepassingen**

2.3.4.9 *Koper (Cu 99,8)*

Spuitlagen van koper hebben een goede geleidbaarheid voor elektriciteit en warmte. Zij zijn sneller aan te brengen dan galvanische koperlagen en machinaal tot een glad oppervlak te bewerken. Het spuiten van een koperlaag op stalen rollen en walsen is een snelle en economische methode, die veel wordt toegepast in de grafische- en papierindustrie. Ook kunnen galvanisch verkoperde rollen die beschadigd zijn, op deze manier plaatselijk worden hersteld. Koperlagen worden ook toegepast als soldeerbare en geleidende lagen op koolborstels, condensatoren, dubbele beglazing, schakel- en verwarmingselementen.

2.3.4.10 *Tin (Sn 99,8)*

Tinlagen hebben een goede warmte- en elektrische geleidbaarheid, zijn soldeerbaar en kunnen op praktisch iedere ondergrond zoals metaal, glas, papier en hout worden gespoten. De zeer fijne structuur en het lage smeltpunt maken tinlagen bijzonder geschikt als eerste reproduktielaag bij het vervaardigen van matrijzen voor de kunststofverwerkende industrie. De nauwkeurige weergave van het positieve model maakt nabewerkingen of correcties overbodig. In de levensmiddelenindustrie wordt tin gebruikt voor het herstellen of bekleden van tinlagen in koperen reservoirs. Ook kunnen met glas beklede vaten plaatselijk met tin worden hersteld. Tin kan worden gebruikt als passiveerlaag op staal en vindt toepassing bij afscherming van radiogolven op kunststof omkastingen, als soldeerbare laag op condensatoren, bij de mouldingtechniek (het maken van gespoten matrijzen), als beschermlaag tegen corrosie en als decoratielaag.

2.4 *Thermische spuitpoeders*

2.4.1 *Kenmerken en vervaardiging van poeders*

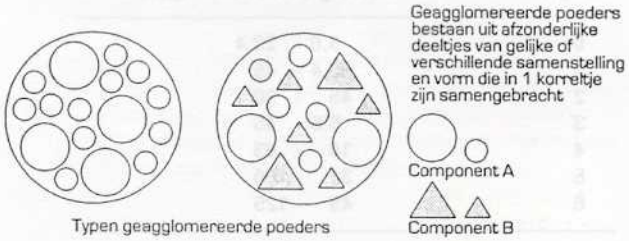
De verscheidenheid waarin poeders worden gefabriceerd is groot. Dat maakt een keuze voor een type fabricageproces en het omschrijven van de eisen te stellen aan de poeders niet eenvoudig. Met een chemische analyse alleen is een poeder onvoldoende gekarakteriseerd.
Poedervormige spuitmaterialen worden als volgt gekenmerkt:
a. chemische samenstelling;
b. korrelgrootte;
c. korrelgrootteverdeling;
d. korrelvorm.

Daarnaast zijn de loopeigenschappen (transport van het poeder tijdens het spuiten), het zuurstofgehalte en de smelteigenschappen evenzeer factoren van belang.

Door variatie van deze eigenschappen kan een groot aantal deklaag-substraat combinaties worden geproduceerd als oplossing voor oppervlakteproblemen van verschillende aard. De onder b, c en d genoemde eigenschappen worden grotendeels bepaald door de produktiemethode van het poeder.
Opspuitpoeders worden onder andere verkregen uit:
- metalen;
- metaallegeringen;
- keramische materialen;
- samengestelde materialen.

Voor het vervaardigen van poeders is een groot aantal technieken voorhanden. Ze zijn in drie categorieën in te delen:
1. Door vanuit massief materiaal met behulp van breken, malen enz. het poeder te maken;
2. Door metalen en legeringen in vloeibare toestand met behulp van stromende vloeistoffen (meestal water) en gassen te verstuiven (atomatiseren);
3. Door middel van chemische processen.

Hierna worden de poeders in vele gevallen nog verder bewerkt. Dit zijn bewerkingen als:
- agglomereren, zie figuur 2.1;
- omhullen. Hierbij wordt een poederdeeltje omhuld door een materiaal van een andere samenstelling;
- sferodiseren. Een bewerking om een hoekige poedervorm om te zetten in een meer ronde.



figuur 2.1 Mogelijkheden voor het verkrijgen van combinaties van poeders

Door deze bewerkingen kunnen de eigenschappen van de poeders aan het gebruiksdoel worden aangepast.
De in dit hoofdstuk opgenomen tabellen zijn afkomstig uit DIN 32 529. Volstaan is met de hierbij behorende aanduidingen en is vanwege de complexiteit afgezien van eigen typeringen.

Vervaardiging poeders uit metalen en legeringen

De meeste poeders bestaande uit metalen en legeringen worden vervaardigd door het verstuiven van de materialen. Daar waar gas als verstuiver wordt gebruikt, worden ronde korreltjes verkregen. Dat is de meest gunstige vorm in verband met bijvoorbeeld de loopeigenschappen van het poeder.

Vervaardiging van oxydische poeders

Oxydische poeders worden geproduceerd door verschillende methoden zoals breken, malen enz. Dit is mogelijk aangezien het uitgangsmateriaal bros is. Een andere methode is het agglomereren van de poeders en ook door middel van plasmasmelten kunnen poeders worden vervaardigd.

2.4.1.1 *Chemische samenstelling*

De chemische samenstelling mag worden beschouwd als het primaire keuzecriterium. Er is een grote variëteit van spuitpoeders ter beschikking, zoals metalen, legeringen, oxyden, carbiden en andere harde materialen, voor het verbeteren van de slijtage-eigenschappen van een oppervlak. Spuitpoeders kunnen eveneens bestaan uit mengsels van relatief zachte metalen en harde materialen. Ook kan een materiaal zijn opgebouwd uit een harde kern en een metallische schil. Het percentage hard materiaal kan tussen wijde grenzen worden gevarieerd, waardoor poeders met variabele eigenschappen, aan te passen aan het slijtageproces, ter beschikking staan. In het algemeen kan het poeder met betrekking tot de chemische samenstelling worden onderscheiden in twee afzonderlijke categorieën: de insmeltlegeringen en de materialen die niet bestemd zijn om na het spuiten ingesmolten te worden.

2.4.1.2 *Korrelgrootte*

Vanuit de produktiepraktijk zijn genormaliseerde korrelgrootte-indelingen ontstaan, waarvan de belangrijkste zijn vermeld in tabel 2.9

tabel 2.9 Meest voorkomende korrelafmetingen voor thermische spuitpoeders

Kengetal	Korrelgroottebereik (µm)
0	5,6 - 22,4
1	22,4 - 45
2	45 - 90
3	5,6 - 45
4	16 - 63
5	32 - 106
6	45 - 125

De huidige poedertransporteurs en poederdoseer-apparaten maken het gebruik van zeer fijne poeders mogelijk, zoals bijvoorbeeld een fractie van 5,6 - 12,5 µm. Door het spuiten met zulke poeders worden gladde oppervlaktelagen verkregen die voor veel toepassingen een nabewerking overbodig maken. Computergestuurde spuitinstallaties vereisen nauwe toleranties ten aanzien van vorm, korrelgrootte en korrelgrootteverdeling van het spuitpoeder.
Voor de hoge snelheidsprocessen (het HVOF-spuiten) zijn poeders vereist met een korrelgrootte van 22,4 - 45 µm. Het vlamspuiten maakt daarentegen juist gebruik van een iets grover poeder, bijvoorbeeld van 45 - 90 µm. De apparatuur hiervoor is uitgerust met relatief eenvoudige poedertoevoer en -injectiesystemen, waardoor van de te verwerken poeders goede transporteigenschappen worden verlangd.
Poeder-vlamspuitapparatuur wordt bij voorkeur gebruikt voor het aanbrengen van insmeltlegeringen. Het insmeltvermogen van deze legeringen wordt geringer bij kleinere afmetingen van de korrel. Derhalve hebben deze poeders bij voorkeur ook afmetingen van 45 - 90 µm.
Bij het plasmaspuiten kunnen poeders met een zeer groot afmetingenbereik worden verwerkt. In het algemeen worden poeders beneden 100 µm toegepast.

2.4.1.3 *Korrelgrootteverdeling*

De genoemde korrelgroottebereiken vormen de eerste kwalificatie ten aanzien van de afmetingen. Een tweede kwalificatie wordt gegeven door de korrelgrootteverdeling van een bepaalde zeeffractie vast te leggen. Daarmee wordt voorkomen dat er binnen een bepaalde fractie wezenlijke verschuivingen naar de boven- of de ondergrens plaatsvinden.

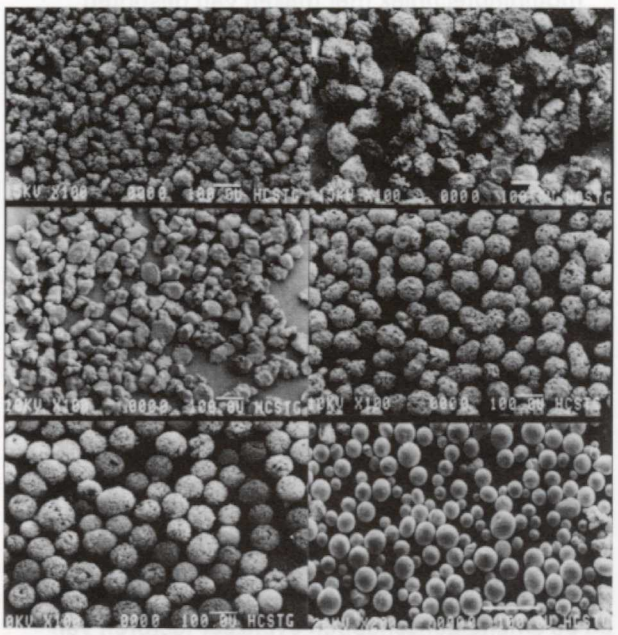
2.4.1.4 *Korrelvorm*

De voorkeur gaat uit naar poeders met een ronde vorm. Deze hebben bij het poedertransport de beste loopeigenschappen. Ook is de bol de meest gunstige vorm voor de verhouding inhoud/oppervlak en zullen verontreinigingen op het oppervlak minimaal zijn en daardoor de minste invloed hebben op de spuiteigenschappen. Door het verstuiven van het basismateriaal in een gas (atomiseren) wordt de ronde vorm het meest benaderd.
Nadeel van de bolvorm is, dat de verhouding van het specifieke oppervlak ten opzichte van de massa minimaal is. Hierdoor is het opwarmen moeilijker dan bij andere korrelvormen.

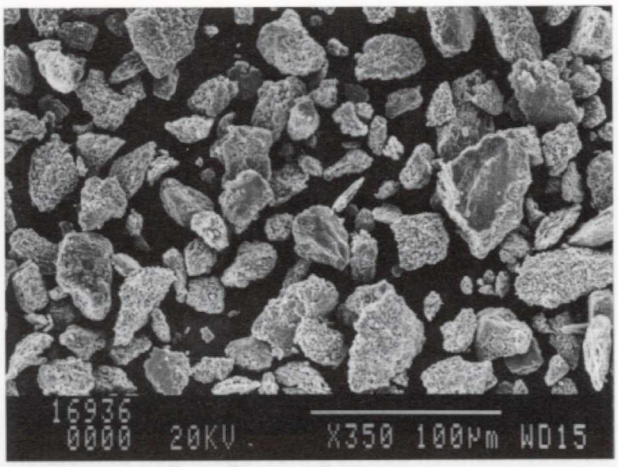
2.4.2 ***Niet-insmeltmaterialen***

2.4.2.1 *Zuivere metalen en legeringen*

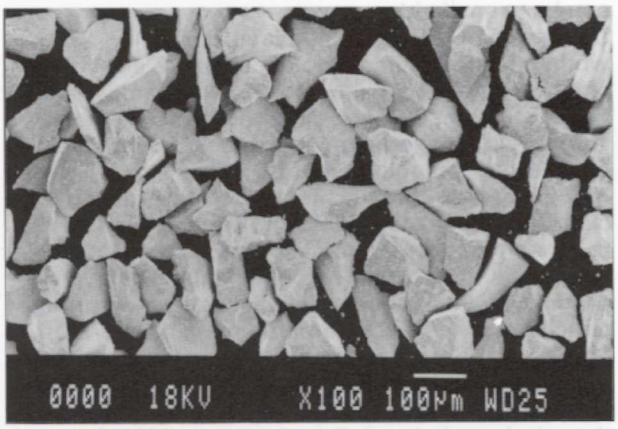
- **Zuivere metalen**
  Zuivere metalen zoals aluminium, chroom, molybdeen, wolfraam, titaan en tantaal, alle met een basissamenstelling van meer dan 99% van het betreffende metaal, worden toegepast bij het atmosferische en het lagedruk plasmaspuiten. De korrelvorm van deze poeders varieert sterk. Het materiaal kan splintervormig of rond zijn, zoals te zien is aan het voorbeeld in figuur 2.2 die variaties van molybdeen weergeeft en de figuren 2.3, 2.4 en 2.5, waarin respectievelijk chroom, tantaal en aluminium wordt getoond.



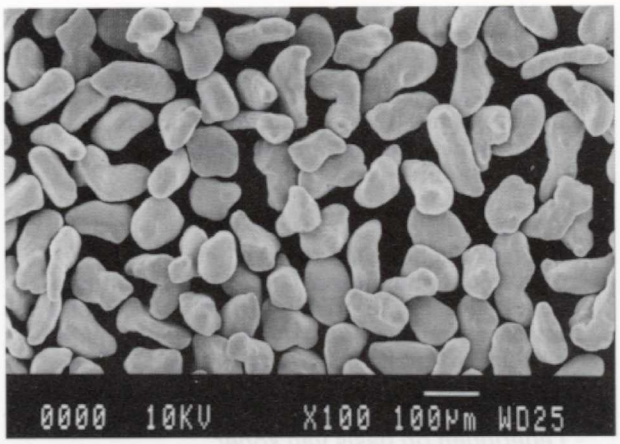
figuur 2.2 Molybdeen spuitpoeder met verschillende korrelvormen, ≈ 100 µm



figuur 2.3 Chroom spuitpoeder



figuur 2.4 Tantaal spuitpoeder



figuur 2.5 Aluminium spuitpoeder

Hieruit blijkt dat voor de reproduceerbaarheid van een deklaag het van belang is, de vorm naast de samenstelling mee te nemen in het kwaliteitsbepalende voorschrift. De gebruiker kan met eenvoudige microscopische hulpmiddelen zelf een effectieve controle uitvoeren van de op verschillende tijdstippen geleverde poeders. Voor de samenstellingen zie tabel 2.10

- **Metaallegeringen** (tabel 2.11)
  - *Nikkel-chroomlegeringen*
  De basislegering bestaat uit 80% nikkel en 20% chroom. Om de hechting met het substraat en het gedrag bij hoge temperatuur te verbeteren, worden ijzer, molybdeen, wolfraam en aluminium toegevoegd. Afhankelijk van de eisen die men stelt aan het zuurstofgehalte, worden deze poeders gemaakt door gesmolten materiaal te verstuiven met water of met schutgas.

tabel 2.10 Metalen spuitpoeders volgens DIN 32529

Code	Aanduiding	Chemische samenstelling in %									
		Al	Cu	Ni	Cr	Mo	Ti	C (max.)	O (max.)	N (max.)	H (max.)
C9	Al 99	99	-	-	-	-	-	-	0,5	-	-
C8	Cu 99	-	99	-	-	-	-	-	-	-	-
C7	Ni 99,3	-	-	99,3	-	-	-	0,1	0,5	0,1	-
C4	Cr 98,5	max. 0,5	-	-	98,5	-	-	0,1	0,8	0,1	-
C5	Mo 99	-	-	-	-	99	-	0,15	0,3	0,1	-
C1	Ti 99	-	-	-	-	-	99	0,3	0,3	0,3	0,1

tabel 2.11 Metaallegeringen spuitpoeders volgens DIN 32529

Code	Aanduiding	Chemische samenstelling in %										
		C (max.)	Ni	Cr	Co	W	Mo	Cu	Al	Mn (max.)	Fe	Si (max.)
G1.2	Ni-Al 95-5	-	Rest	-	-	-	-	-	4...5,5	-	-	2,5
D2.2	X Ni Al 70 30	-	68...72	-	-	-	-	-	28...32	-	-	0,5
D1.1	X 20 NiCr 78 20	0,25	76...80	18...21	-	-	-	-	-	2,5	max.1	1,5
D1.2	X 30 NiCrFe 75 15 8	0,30	Rest	14...17	-	-	-	-	-	-	6...10	-
D4.1	CuAl 10 Fe	-	-	-	-	-	-	Rest	9...11	-	max.1	-
D5.4	X 30 CoCrNiW 50 26 10 7	0,50	9,5...11,5	24...27	Rest	6,5...8,5	-	-	-	0,6	max.2	0,6
D1.4	X 20 NiCrAl 74 19 5	0,25	Rest	17...20	-	-	-	-	3...6	2,5	max.1	1,5
H4.1	NiMoAl 90 5 5	-	Rest	-	-	-	4...5,5	-	4...5,5	-	-	2,5

- *Nikkel-aluminiumlegeringen*
  Deze legeringen op basis van nikkel met 5 tot 30% aluminium, worden vooral gebruikt als tussenlaag tussen de toplaag en het substraat om de hechting te verbeteren, of om de thermische spanningen daartussen te verminderen.

- *Gelegeerd staal*
  Het nikkelgehalte ligt tussen 1 en 14%, het chroomgehalte tussen 14 en 18%. Bovendien bevatten deze materialen tot 3% molybdeen en tot 2% mangaan, naast geringe hoeveelheden silicium en koolstof. Deze legeringen worden gebruikt als corrosiebestendige deklagen.

- *Legeringen op basis van koper*
  Toegepast worden vooral koper-aluminium, koper-nikkel en koper-tin legeringen. Het koper-nikkel-indium poeder met 35 tot 40% nikkel en 3 tot 6% indium, rest koper, is van grote betekenis in de luchtvaartindustrie. Er kunnen dichte, oxyde-arme lagen mee worden geproduceerd, die uitstekende eigenschappen hebben ten aanzien van fretting en cavitatie.

- *Legeringen van kobalt, chroom en wolfraam*
  Deze legeringen zijn voornamelijk bekend onder de merknaam "Stelliet". Zij zijn slijtage- en corrosiebestendig, ook onder hoge temperatuuromstandigheden. Voorbeeld: deklaag voor motorkleppen.

- *Legeringen op basis van kobalt, nikkel, chroom en molybdeen*
  De positieve eigenschappen van deze legeringsgroep worden bepaald door de vorming van harde, slijtvaste structuurbestanddelen die ingebed zijn in een relatief zachte basislegering. Ze zijn bekend onder de merknaam "Triballoy". Ze koppelen ductiliteit aan hardheid. In wrijvend contact met een ander materiaal blijken ze, ook bij hoge temperaturen, over een goede weerstand tegen frettingslijtage te beschikken.

- *Aluminium legeringen*
  Van deze groep is vooral aluminium met 12% silicium van belang, omdat met deze legering dichte en harde oppervlaktelagen kunnen worden geproduceerd. Een mengsel van 40% polyester met 60% AlSi 88/12 wordt gebruikt als oxydatiebestendige, deformeerbare turbinehuisafdichting van straalmotoren tot een temperatuur van 350°C. De deformeerbaarheid wordt verkregen door het inbouwen van poriën, die op hun beurt worden veroorzaakt door het polyester dat bij verhoogde temperatuur verbrandt.

2.4.2.2 *Carbiden* (tabel 2.12)

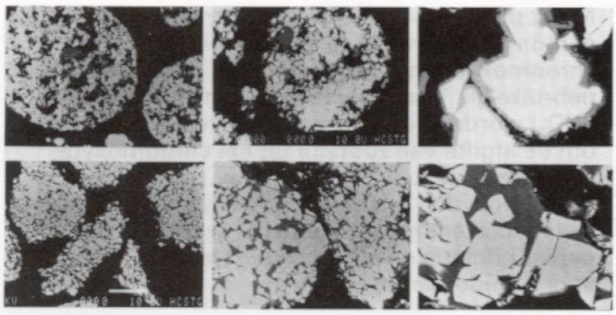
Carbiden worden gemengd met legeringen om de slijtageweerstand van vlamgespoten deklagen te verhogen. Carbiden kunnen ook met een bindmateriaal worden gesinterd en daarna gemalen. Deze carbiden bevattende materialen worden voornamelijk met de plasmatoorts verspoten. Carbiden kunnen ook nog met legeringen of metalen worden geagglomereerd. Deze materialen worden bij voorkeur verwerkt met de plasmatoorts of met een hoge snelheidsproces.
De meest voorkomende carbiden zijn wolfraamcarbide (in de modificaties WC en W_2C), chroomcarbide en titaancarbide. Wolfraamcarbide wordt met 9 tot 20% kobalt, chroomcarbide met chroom-nikkellegeringen en titaancarbide met nikkel gesinterd of geagglomereerd.
Met de term 'Wolframschmelzkarbid' wordt een bij circa 2525°C eutectisch stollend mengsel van de twee wolfraamcarbidemodificaties WC en W_2C aangeduid. Door snelle afkoeling tijdens de produktie van dit poeder ontstaat een vedervormige structuur van de beide componenten, die wordt gekenmerkt door een combinatie van hardheid en taaiheid. De temperatuur van een 'Wolframschmelzkarbid'deklaag mag tijdens een thermische nabehandeling niet boven 1400°C uitkomen.
De wijze van fabriceren van deze samengestelde poeders wordt bepaald door de gewenste morfologie (opbouw, vorm) en de vereiste korrelafmetingen van de carbiden in de deklagen. Dit om daarmee tegemoet te komen aan het heersende slijtagemechanisme. Figuur 2.6 geeft een overzicht van WC-Co poeders met dezelfde chemische samenstelling maar met verschillende morfologie.

2.4.2.3 Omhulde poeders

Te onderscheiden zijn:
a. Poeders met opgelijmde, niet afsluitende omhulsels

tabel 2.12 Carbidenhoudende spuitpoeders volgens DIN 32529

Code	Aanduiding	Chemische samenstelling in %						
		C	W	Co	Cr	Ni	Fe (max.)	Si (max.)
E1.2	W-Schmelzkarbid	3,8...4,3	Rest	-	-	-	-	-
E1.3	W_2C	3,1...3,3	Rest	-	-	-	-	-
E1.1	WC	4,6...5,0	Rest	-	-	-	-	-
E2.1	Cr_3C_2	12,8...13,3	-	-	Rest	-	0,7	0,1
E3.3	WC-Co 88-12	min. 5,1	Rest	11...13	-	-	2	-
H5.2	WC-Co 88-12	5,1...5,7	Rest	10,5...13,5	-	-	2	-
G6.2	WC-Co 88-12	5,2...5,5	Rest	11...13	-	-	0,5	-
G7.3	WC-Ni 88-12	5,2...5,5	Rest	-	-	11...13	0,5	-
G8.1	Cr_3C_2-Ni 83-17	10,3...11,1	-	-	Rest	16...19	0,5	-



figuur 2.6 WC-Co 88-12 poeder met verschillende morfologie
a: geagglomereerd
b: geagglomereerd en gesinterd
c: WC met een omhulling van kobalt
d: fijne WC-deeltjes in hardmetaal
e: grove WC-deeltjes in hardmetaal
f: gesmolten WC-Co met grote WC-korrels

Deze categorie poeder omvat uitsluitend metalen of legeringen als kern waarop aan de buitenkant zeer fijn aluminiumpoeder gelijmd zit. Bij het vlamspuiten komt door een chemische reactie van het aluminium met de kern of door oxydatie van het aluminium extra thermische energie vrij, die het kerndeeltje benut voor een betere hechting met het substraat. Als kernmateriaal wordt nikkel, nikkel-chroom en nikkelmolybdeen gebruikt. De exotherm reagerende nikkel-aluminides zijn vertegenwoordigers van deze groep.

b. Poeders met gesloten omhulsel
Deze poeders worden hoofdzakelijk toegepast wanneer een sterke binding van carbiden met de legeringsmatrix gewenst is. Bij in te smelten deklagen (zie onder 2.4.3) wordt door het afsluitende bindmateriaal verhinderd dat de carbidekern zelf tot smelten wordt gebracht. Als voorbeelden van deze poeders kunnen worden genoemd: wolfraamcarbiden met een omhulling van kobalt of wolfraam en chroomcarbiden met een nikkelschil.
Een veel toegepast materiaal in straalmotoren bestaat uit een kern van grafiet en een mantel van 60 tot 85% nikkel. Dit materiaal wordt gespoten op afdichtingsvlakken van het turbinehuis, omdat een turbineschoep die door thermische uitzetting het afdichtingsvlak raakt, in staat is dit ductiele afdichtingsmateriaal plastisch te deformeren.

2.4.2.4 *Oxyden* (tabel 2.13)

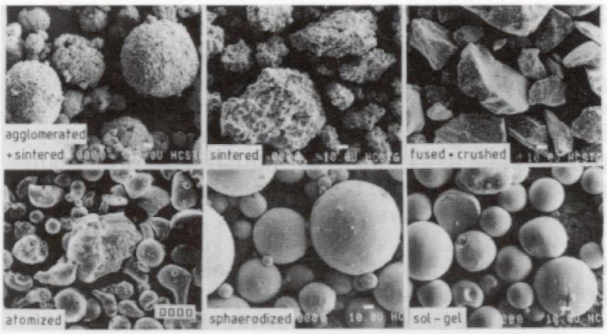
Spuitlagen van oxydische materialen worden gebruikt vanwege hun hoge hardheid, slijtvastheid, de chemische bestendigheid en hun warmte-isolerende eigenschappen. Toepassingen zijn op grote schaal te vinden in de industriesectoren textiel, papier, chemie en de bouw van reactoren, verbrandingsmotoren en turbines.

Er zijn twee afzonderlijke categorieën van oxydische poeders te onderscheiden naar hun toepassing:
- *Oxydische poeders voor warmte-isolerende deklagen*
Voor straal- en verbrandingsmotoren zijn warmte-isolerende lagen van groeiende betekenis. Deze zogenaamde 'thermal barrier' deklagen staan hogere bedrijfstemperaturen in de verbrandingskamer toe en beschermen de onderliggende metalen tegen oververhitting en corrosie.
Als basisoxyde voor warmte-isolerende lagen wordt zirkoonoxyde gebruikt. Toevoeging van 5 tot 30 gewichtsprocenten magnesiumoxyde, 7 tot 20 gewichtsprocenten yttriumoxyde of oxyden van zeldzame aarden is noodzakelijk om de samenstelling bij hoge temperaturen te stabiliseren tot op kamertemperatuur. Bij deze overgang vindt er anders een sterke volumeverandering plaats. Er kunnen scheuren ontstaan en de thermoshock-bestendigheid neemt af.
De thermoshockbestendigheid is gunstig te beïnvloeden door het inbouwen van een zekere mate van porositeit. De deklaag krijgt daardoor een elastischer karakter. Men heeft derhalve gezocht naar morfologieën die de thermoshock-bestendigheid gunstig beïnvloeden door een ingebouwde porositeit.
Figuur 2.7 geeft een overzicht van verschillende uiterlijke vormen van gestabiliseerd zirkoonoxyde met 8% Y_2O_3 en een afmetingenbereik van 10 tot 90 µm en in figuur 2.8 worden doorsneden van de afzonderlijke korrels van deze poeders getoond.

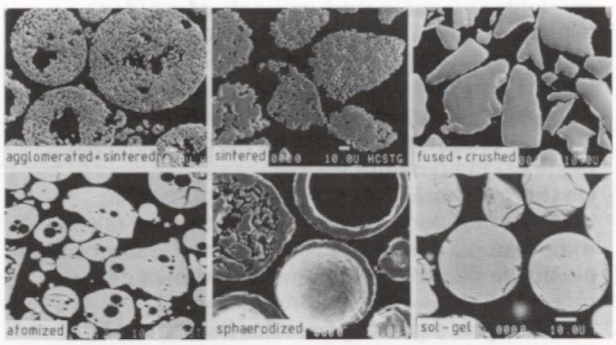
- *Oxydische poeders voor slijtvaste deklagen*
De poeders voor slijtvaste oxydische lagen kunnen onderscheiden worden naar hun twee hoofdbestanddelen: aluminiumoxyden en chroomoxyden. Naast puur aluminiumoxyde bestaat er een categorie met toevoeging van 3, 13, 40 of 50% titaanoxyde. Tevens is beschikbaar aluminium-chroomoxyde (2% Cr_2O_3) en aluminium-magnesiumoxyde.

tabel 2.13 Oxydische spuitpoeders volgens DIN 32529

Code	Aanduiding	Chemische samenstelling in %								
		Al_2O_3	TiO_2	ZrO_2	Cr_2O_3 (min.)	CaO	MgO	SiO_2 (max.)	FeO	Y_2O_3
F1.1	Al_2O_3 99,5	min.99,5	-	-	-	-	-	0,1	-	-
F2.1	Al_2O_3-TiO_2 97-3	min.96	max. 3,5	-	-	-	-	1	1	-
F2.3	Al_2O_3-TiO_2 87-13	Rest	12...14	-	-	-	-	1	0,5	-
F2.4	Al_2O_3-TiO_2 60-40	Rest	38...42	-	-	-	-	1	0,5	-
F4.1	Al_2O_3-MgO 70-30	Rest	-	-	-	-	28...31	1,5	0,5	-
F5.1	Cr_2O_3 99,5	-	-	-	99,5	-	-	0,25	0,1	-
F7.1	TiO_2 99	-	min. 99	-	-	-	-	0,5	0,3	-
F9.1	ZrO_2-CaO 95-5	max. 0,5	-	Rest	-	5...7	-	0,4	-	-
F9.3	ZrO_2-CaO 70-30	-	-	Rest	-	28...31	-	-	-	-
F12.1	ZrO_2-Y_2O_3 93-7	max. 0,2	max. 0,3	Rest	-	-	-	0,5	0,2	6...8



figuur 2.7 Verschillende vormen van gestabiliseerd zirkoonoxyde met 8% Y_2O_3; afmetingen 10 - 90 µm
a: geagglomereerd en gesinterd
b: gesinterd
c: gesmolten en gemalen
d: verstoven
e: gesferodiseerd
f: sol gel



figuur 2.8 Structuur van de afzonderlijke korrels zoals getoond in figuur 2.7
a: geagglomereerd en gesinterd
b: gesinterd
c: gesmolten en gemalen
d: verstoven
e: gesferodiseerd
f: sol gel

Zuiver aluminiumoxyde is extreem hard, maar is niet slagvast of schokbestendig. De noodzakelijke taaiheid voor sommige constructieve toepassingen wordt verkregen door toevoeging van titaandioxyde. De kleur van het aluminiumoxyde verandert daardoor van wit naar donkergrijs. Als typisch toepassingsgebied voor titaandioxyde bevattende aluminiumoxyden kunnen de garengeleiders in de textielindustrie worden genoemd.

Naast puur chroomoxyde zijn er mengoxyden zoals chroomoxyde met 3, 40 en 55% TiO_2 en chroomoxyde met titaanoxyde en siliciumoxyde gebruikelijk. Titaanoxyde (TiO_2) en siliciumoxyde (SiO_2) worden aan het chroomoxyde toegevoegd om de afgifte van zuurstof uit het chroomoxyde tijdens het spuiten tegen te gaan.
Chroomoxyden worden vooral toegepast als slijtagebestendige deklaag voor walsen in de papierindustrie en als erosiebestendige deklaag voor pomponderdelen.

2.4.3 *Poedervormige insmeltmaterialen* (tabel 2.14)

In het voorgaande zijn poeders beschreven die als gespoten deklaag geen thermische nabehandeling meer ondergaan. Afgezien van mechanische nabewerkingen worden de ermee te vervaardigen deklagen in gespoten toestand gebruikt.
De nu volgende zogenaamde insmeltlegeringen worden als deklaag relatief koud opgespoten. Daarna krijgen ze met behulp van een aparte gas-zuurstof brander, een gloeioven, door middel van inductie of met een laser een thermische nabehandeling bij hoge temperatuur. Deze temperatuur, afhanklijk van de samenstelling, kan variëren van 1050 tot 1150° C. Deze nabehandeling wordt insmelten of met een Engelse term 'fusen' genoemd.
Bij het insmelten verkrijgt de deklaag een hechtsterkte die boven de sterkte van constructiestaal ligt. Tevens wordt de typische lamellaire microporeuze structuur die ontstaat bij het opspuiten van deze legeringen omgezet in een homogene deklaag. Deze oppervlaktelagen zijn in hun kwaliteit alleszins te vergelijken met een opgelaste laag. Ten opzichte van oplaslegeringen hebben ze het voordeel van een sterk varieerbare chemische samenstelling, plus het voordeel dat ze voor een gering deel worden vermengd met het basismateriaal. Hierdoor blijven ongewenste legeringseffecten achterwege.
De insmeltlegeringen worden gekenmerkt door de aanwezigheid van de elementen borium en silicium, die tijdens de thermische nabehandeling bij voorkeur oxyderen en zodoende de overige elementen hiervoor behoeden. De werking van borium en silicium komt overeen met die van een flux bij het solderen.
Op basis van de chemische samenstelling kunnen de insmeltlegeringen in twee hoofdgroepen worden onderscheiden

2.4.3.1 *Op basis van nikkel-chroom-borium-silicium*

Aan de aanwezige basiselementen wordt chroom

tabel 2.14 Insmeltlegeringen volgens DIN 32529

Code	Aanduiding	Chemische samenstelling in %									
		C (max.)	Ni	Co	Cr	Mo	W	Cu	Fe	B	Si
A2.2	Ni-CrBSi 82-10	0,2	Rest	-	9...11	-	-	-	2...3	2,0...2,8	2,2...3,0
A2.4	Ni-CrBSi 65-16	0,5	Rest	-	15...17	2,2...3,2	-	2,2...3,2	2,5...4,5	3,4...4,2	3,6...4,4
A2.5	Ni-CrBSi 70-16	1,1	Rest	-	15...18	-	-	-	3,5...4,5	3,1...3,9	3,6...4,4
B1.3	Co-NiCrBSi 46-19	0,9	16...17	Rest	18...20	-	9...10	-	max. 1	3,4...4,1	2,5...3,0
B1.4	Co-NiCrBSi 36-25	0,3	22...25	Rest	17...19	5...7	-	-	2...3	2,6...3,4	3,0...3,9

toegevoegd om de eigenschappen van de legering aan te passen voor de toepassing. Helemaal zonder chroom zijn de legeringen zacht. Zij worden onder andere gebruikt als soldeermiddel voor roestvast staal. In de spuittechniek zijn het vooral de legeringen met 10,0 tot 19,0% Cr die toepassing vinden ter bestrijding van slijtage, erosie en corrosie. De hardheid wordt enerzijds veroorzaakt door de chroomnikkellegering, anderzijds door de aanwezige boriden en siliciden.
De slijtagebestendigheid van de matrix kan worden vergroot door toevoeging van wolfraamcarbide-korrels. Het wolfraamcarbide wordt met een relatief geringe hoeveelheid Co (of Ni) geagglomereerd en als agglomeraat gemengd met de nikkel-chroom-borium-silicium matrix. Een typische samenstelling is bijvoorbeeld een poeder dat voor 35 gewichtsprocenten bestaat uit het Co-WC agglomeraat en voor 65 procent uit matrixmateriaal. De matrix wordt door de thermische nabehandeling gesmolten en fungeert na het stollen als vul- of inbedmateriaal voor de zeer slijtvaste wolfraamcarbidedeeltjes. Het toegevoegde kobalt fungeert als bindmiddel tussen het ongesmolten wolfraamcarbide en de matrix. Tevens beschermt het Co het WC-deeltje tegen oververhitting tijdens het opspuiten.
Een typische samenstelling van het Co-WC agglomeraat is 12% Co en 88% WC. Een typische samenstelling van het matrixmateriaal is 70% Ni, 17% Cr, 4% Fe, 4% B, 4% Si, 0,5-1% C. Naarmate er meer wolfraamcarbide aan de matrix wordt toegevoegd, neemt de slijtagebestendigheid toe. Het Co-WC agglomeraat-gehalte kan 80 gewichtsprocenten bedragen.

2.4.3.2 *Op basis van kobalt-chroom-borium-silicium*

Aan deze elementen wordt nikkel en chroom en in een andere groep van materialen, nikkel, chroom en wolfraam toegevoegd als hoofdlegeringsbestand-deel.
Een typische matrixlegering uit deze tweede hoofdgroep is bijvoorbeeld 40% Co, 27% Ni, 18,0% Cr, 2,5% Fe, 0,2-0,5% C, 3,0% Si, 3,0% B en 6,0% Mo. Een typische kobalt-basislegering met wolfraam is bijvoorbeeld: 48% Co, 1% Ni, 19% Cr, 13% W, 3% Si, 2,5% B en 1,5% C.
De kobalt-basislegeringen vinden, evenals de eerder beschreven nikkel-chroomlegeringen, toepassing als ingesmolten deklaag ter bestrijding van slijtage, erosie en corrosie. Ook deze legeringen kunnen in hun slijtvastheid worden gestuurd door de matrixcompositie en toevoegingen van harde fasen. Globaal kan ten aanzien van de toepassingen worden gesteld dat Co-basislegeringen bij voorkeur worden toegepast ter bestrijding van hogetemperatuurcorrosie of slijtageproblemen. In eerste instantie zal een nikkel-basislegering worden gekozen, omdat, door de aanwezigheid van een smelttraject, de nikkel-chroom matrix gemakkelijker insmeltbaar is dan een Co-basis matrix.
Het insmeltproces kan bij het geleidelijk smelten van de nikkel-chroom matrix optisch beter worden gevolgd dan bij het Co-basismateriaal.
De nikkelbasis-legeringen zijn goedkoper dan de Co-legeringen. De uiteindelijke keuze voor een materiaal op basis van kobalt kan mede worden bepaald door de ervaringen met beide insmeltmaterialen die het producerende bedrijf heeft te bieden.
De matrixmaterialen uit beide hoofdgroepen worden geproduceerd door het verstuiven van gesmolten materiaal. De deklagen worden voornamelijk aangebracht met een vlamspuitinstallatie. De meest algemene kenmerken van ingesmolten lagen zijn: slijtagebestendigheid, corrosievastheid, dichtheid, uitstekende hechting en schokbestendigheid.

2.5 *Verdere ontwikkelingen van opspuitmaterialen*

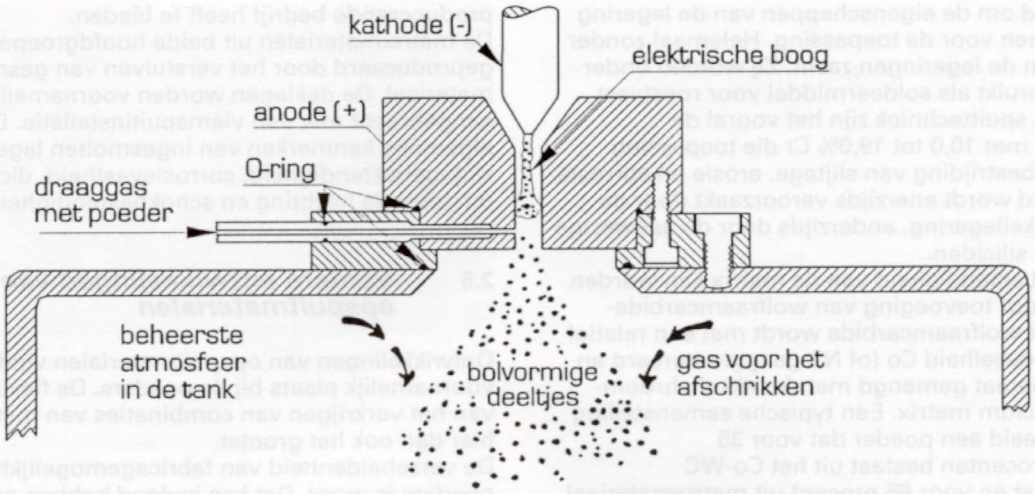
Ontwikkelingen van opspuitmaterialen vinden voornamelijk plaats bij de poeders. De flexibiliteit van het verkrijgen van combinaties van materialen is hier dan ook het grootst.
De verscheidenheid van fabricagemogelijkheden van poeders is groot. Dat kan invloed hebben op de uiteindelijke eigenschappen en zeker ook op de korrelvorm en -verdeling. Voor de gebruiker is het niet eenvoudig vast te stellen in hoeverre nieuwere poeders ook een verbetering betekenen. Onder andere de gebruikte opspuitapparatuur en de vakkundigheid bij de uitvoering zijn van groot belang. Toch is het nuttig om te weten welke nieuwe mogelijkheden worden geboden. Het is echter zaak dat de gebruiker zich door de leverancier door middel van spuitproeven laat overtuigen dat anders gefabriceerde poeders inderdaad een beter resultaat geven.

2.5.1 *Holle spuitpoeders*

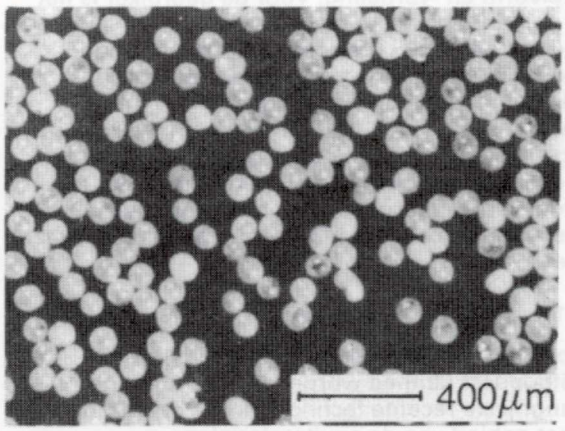
De produktie en de toepassing van holle spuitpoeders kunnen worden gerekend tot de belangrijkste recente technologische ontwikkelingen op het gebied van de spuitmaterialen.
De produktie van deze poeders vindt plaats in een inerte gasatmosfeer. Figuur 2.9 toont de schematische opzet ervan.

Principieel bestaat de installatie uit een plasmatoorts en een met inert gas gevulde tank. Het uitgangspoeder wordt in geagglomereerde toestand geïnjecteerd in de plasmaboog, die de verschillende componenten van het agglomeraat laat samensmelten tot een homogene legering. Door de reactie-omstandigheden in de tank ontstaat een bolvormig poeder zonder kern: het poeder is hol. Dit gepatenteerde proces wordt momenteel toegepast voor de fabricage van oxydisch-keramische deklaagmaterialen op basis van aluminiumoxyde, zirkoonoxyde en chroomoxyde. Als stabilisatiecomponent wordt aan de pure oxyden magnesiumoxyde of yttriumoxyde toegevoegd. Uit de figuren 2.10 en 2.11 blijkt het bolvormige en het holle karakter van dit type poeder.

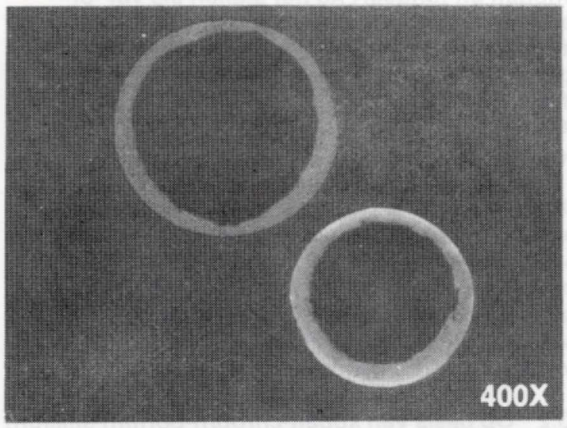
Op basis van het fabricageproces en de structuur bieden holle spuitpoeders een aantal voordelen ten opzichte van massieve poeders die geproduceerd zijn met conventionele methoden. De bolvorm betekent optimale eigenschappen ten aanzien van dosering, transport en injectie van het poeder, waardoor de reproduceerbaarheid van de gespoten deklaag kan worden verbeterd. De holle vorm houdt in, dat de toe te voeren proceswarmte niet meer over een relatief grote afstand binnen het spuitdeeltje hoeft te worden getransporteerd.



figuur 2.9 Schematische opzet van het fabricageproces voor holle spuitpoeders



figuur 2.10 Vorm van de poederkorrels



figuur 2.11 Doorsnede van enkele korrels

Vooral bij slechtgeleidende keramische materialen kan het voorkomen, dat de buitenkant van het spuitdeeltje oververhit raakt, terwijl de kern koud blijft. Door het ontbreken van de kern wordt dit probleem dus vermeden. Het resultaat is, dat ook slecht warmtegeleidende materialen gelijkmatiger worden opgewarmd door de procesvlam. De hieruit resulterende voordelen zijn een verhoogd spuitrendement en een verhoogde produktiesnelheid. De gelijkmatige doorwarming levert een voorspelbare en reproduceerbare kristalstructuur, gekoppeld aan een verhoogde chemische homogeniteit. Samenvattend kan worden gesteld dat met dit type poeder reproduceerbare deklagen van hoge kwaliteit sneller dan bij conventionele uitgangsmaterialen kunnen worden geproduceerd.
Het toepassingsgebied van deze poeders hangt, evenals dit het geval is bij massieve poeders, nauw samen met het korrelgroottegebied. Een globale indeling wordt aangegeven in tabel 2.15.

2.5.2 *'One step' poeders*

Dit zijn poeders die speciaal zijn ontwikkeld om in een corrosief milieu toe te passen. Ze worden gebruikt als tussen- en als deklaag. De hechtsterkte is gelijk of beter dan de geagglomereerde poeders en ook de dichtheid moet beter zijn.
Ze worden verkregen door het fijn verstuiven (atomiseren) van het uitgangsmateriaal.

tabel 2.15 Globale indeling van holle spuitpoeders

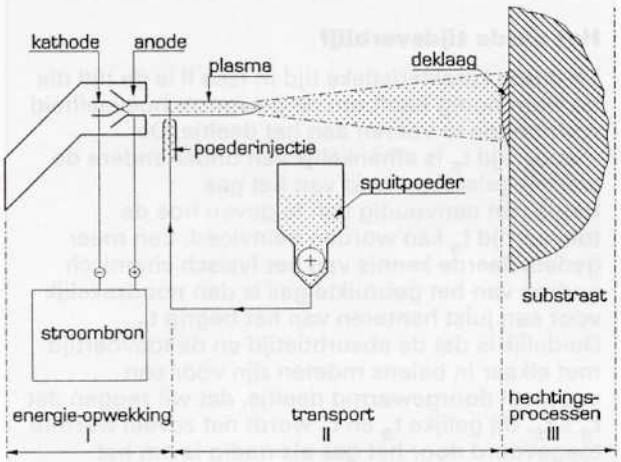
	Korrelgrootte in μm volgens DIN 32529	Toepassingsgebied en deklaagfunktie
I	5- 44	Toe te passen voor dichte en slijtbestendige deklagen met geringe oppervlakteruwheid in gespoten toestand of een gladde mechanisch bewerkte eindtoestand
II	10- 63	Te gebruiken voor autogene en plasmaprocessen. De oppervlakteruwheid in gespoten toestand is fijner en de deklaag heeft een grotere dichtheid dan bij gebruik van poedergrootte bereik III
III	45-125	Te gebruiken voor poreuze, inslijtbare deklagen (abradable coatings)

Hoofdstuk 3

Hechtingsmechanismen bij het opspuiten

3.1 *Inleiding*

Om inzicht te krijgen in de eigenschappen van thermisch gespoten deklagen is het zinvol enkele karakteristieke kenmerken van de processen en de daaruit voortvloeiende deklaageigenschappen nader onder de loep te nemen.
De beschrijving van karakteristieke eigenschappen van een technisch proces gebeurt in het algemeen aan de hand van een zogenaamd model. In dit hoofdstuk zullen twee modelvoorstellingen aan de orde komen. Het eerste model, zie figuur 3.1, wordt gebruikt om enkele procestechnische karakteristieken toe te lichten. Het tweede model (figuur 3.2) heeft betrekking op de interactie van een individueel spuitdeeltje met het substraat. Uit beide modellen volgt de beschrijving van enkele karakteristieke deklaageigenschappen.



figuur 3.1 Schema van het plasmaspuiten als algemene representant van de thermische spuitprocessen

3.2 *Procestechnische invloeden*

In figuur 3.1 is een schema weergegeven van het plasmaspuiten met de daarbij behorende gebieden van het energietransport van de spuitdeeltjes.

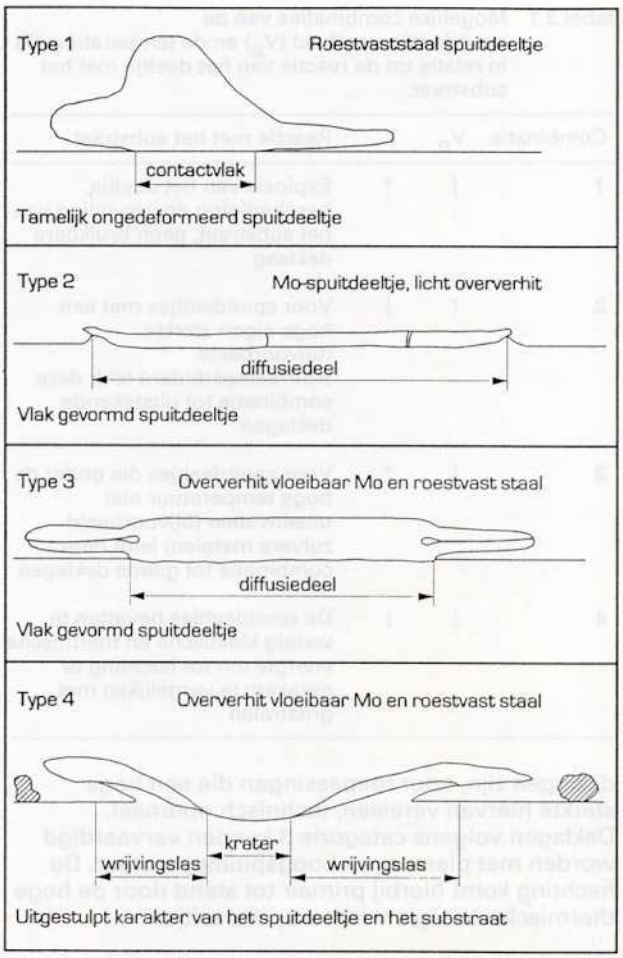
Het schema is onderverdeeld in 3 fasen van energie-overdracht:

Fase I De energie-overdracht van de stroombron naar het plasma. Bij een verbrandingsproces is hieronder te verstaan de omzetting van de chemische energie van de brandstof door verbranding;

Fase II De energie-overdracht van het plasma (of de verbrandingsgassen) naar het spuitmateriaal;

Fase III De energie-overdracht van het spuitdeeltje naar het substraat.

Fase I
Het is van belang te wijzen op twee kenmerkende verschillen tussen een verbrandingsgas en een plasma. De plasmatemperatuur ligt in het algemeen



figuur 3.2 Hoofdtypen van gedeformeerde spuitdeeltjes van metalen of legeringen

boven de 12.000 K en de snelheid van het plasma bedraagt enkele honderden meters per seconde. Bij autogene processen hebben de verbrandingsgassen temperaturen die lager zijn dan 3200 K en snelheden van enkele tientallen meters per seconde.
De in ontwikkeling zijnde hoge snelheid vlamspuitprocessen kunnen daarentegen gepaard gaan met zeer hoge gassnelheden. Te denken is hierbij aan snelheden boven de 1000 m/s. De combinatie van de temperatuur en de snelheid van een spuitvlam of spuitplasma is van doorslaggevend belang voor de deklaageigenschappen. Met behulp van het globale schema zoals weergegeven in tabel 3.1 kan de hoofdlijn voor de combinatie van temperatuur en snelheid van een spuitdeeltje worden toegelicht.

Het schema van tabel 3.1 geeft de grote lijn weer. Thermische spuitprocessen moeten in principe voldoen aan een combinatie volgens 2 of 3. De conventionele, nu gangbare processen vertonen in hun werking een overlap van de combinaties 2 en 3 en zijn derhalve niet optimaal geconstrueerd ten aanzien van het proces. De optimalisatie heeft veelal plaats gehad met de commerciële haalbaarheid als achtergrond.
De in ontwikkeling zijnde en reeds commercieel verkrijgbare hogesnelheid vlamspuitprocessen vallen in categorie 2. De hiermee te vervaardigen

tabel 3.1 Mogelijke combinaties van de spuitdeeltjessnelheid (V_p) en de temperatuur (T) in relatie tot de reactie van het deeltje met het substraat.

Combinatie	V_p	T	Reactie met het substraat
1	↑	↑	Explosie van het deeltje, beschadiging en vervuiling van het substraat, geen bruikbare deklaag
2	↑	↓	Voor spuitdeeltjes met een hoge eigen sterkte (bijvoorbeeld wolfraamcarbiden) leidt deze combinatie tot uitstekende deklagen
3	↓	↑	Voor spuitdeeltjes die onder de hoge temperatuur niet uiteenvallen (bijvoorbeeld zuivere metalen) leidt deze combinatie tot goede deklagen
4	↓	↓	De spuitdeeltjes bevatten te weinig kinetische en thermische energie om tot hechting te geraken; te vergelijken met gritstralen

deklagen zijn, voor toepassingen die een hoge sterkte hiervan vereisen, technisch optimaal.
Deklagen volgens categorie 3 kunnen vervaardigd worden met plasma- en boogspuitapparatuur. De hechting komt hierbij primair tot stand door de hoge thermische energie van het spuitdeeltje.

Fase II
Gedurende fase II wordt de kinetische en thermische energie van het plasma (of van een verbrandingsgas) overgedragen aan de spuitdeeltjes.

Warmte-overdracht in fase II

Hier zijn drie karakteristieke tijden van het spuitdeeltje vanaf de apparatuur tot aan het substraat te onderscheiden.

Het eerste tijdsverblijf

De eerste karakteristieke tijd is te definiëren als de verblijftijd t_d, van een spuitdeeltje in het hete gas (kortweg vlam te noemen). De verblijftijd hangt samen met de snelheid, de temperatuur en de lengte van de vlam. Naast deze vlameigenschappen bepalen de deeltjeseigenschappen zoals afmeting, vorm en soortelijke massa de verblijftijd. Een grof deeltje met een hoge soortelijke massa zal door de vlam minder sterk worden versneld dan een fijn deeltje van een licht materiaal.

Het tweede tijdsverblijf

De tweede karakteristieke tijd in fase II is de absorbtietijd t_a, die een deeltje nodig heeft om een bepaalde hoeveelheid warmte in zich op te nemen, te absorberen.

Het is niet algemeen aan te geven hoeveel warmte een deeltje moet absorberen. Zo zal een wolfraamcarbidedeeltje niet te sterk verhit mogen worden, daar het anders uit elkaar zal vallen, terwijl een zuiver metaaldeeltje of sommige legeringen van metalen juist tot boven het smeltpunt verhit dienen te worden voor een optimaal resultaat. Ook de warmtegeleidbaarheid en de afmeting van het deeltje spelen een rol.
Een grof deeltje zal een grotere absorbtietijd voor een bepaalde doorwarming bezitten dan een fijn deeltje. Een goed warmtegeleidend materiaal, zoals de meeste metalen, zal voor een bepaalde doorwarming met minder tijd kunnen volstaan dan een slecht warmtegeleidend deeltje.
Samengevat: Een grof deeltje van een slecht warmtegeleidend materiaal heeft een hogere absorbtietijd dan een fijn deeltje van een goed geleidend materiaal. Of nog anders gezegd: de verblijftijd van het deeltje in de vlam moet minstens zo groot zijn als de absorbtietijd, anders wordt het deeltje onvoldoende doorgewarmd.

Het derde tijdsverblijf

De derde karakteristieke tijd in fase II is de tijd die de vlam nodig heeft om de gewenste hoeveelheid warmte toe te voeren aan het deeltje. De toevoertijd t_s is afhankelijk van onder andere de warmtegeleidbaarheid van het gas.
Het is niet eenvoudig aan te geven hoe de toevoertijd t_s kan worden beïnvloed. Een meer gedetailleerde kennis van het fysisch chemisch gedrag van het gebruikte gas is dan noodzakelijk voor een juist hanteren van het begrip t_s.
Duidelijk is dat de absorbtietijd en de toevoertijd met elkaar in balans moeten zijn voor een optimaal doorgewarmd deeltje, dat wil zeggen dat $t_a \leq t_s$. Bij gelijke t_a en t_s wordt net zoveel warmte toegevoerd door het gas als nodig is om het deeltje tot de gewenste graad te verhitten. Is de toevoertijd kleiner dan de absorbtietijd, dan houdt dit in dat de toegevoerde hoeveelheid warmte in de buitenste schil van het spuitdeeltje wordt opgestuwd. De schil zal oververhit raken en in veel gevallen beginnen te verdampen. De verdamping en de oververhitting gaan gepaard met een hevige rookontwikkeling die in ieder geval ongewenst is.
Is de toevoertijd groter dan de absorbtietijd, dan absorbeert het spuitdeeltje alle aangeboden warmte; er treedt geen oververhitting maar een goede doorwarming op. Of er in die situatie, dus als $t_a \leq t_s$ voldoende warmte wordt toegevoerd hangt dan af van de verblijftijd van het deeltje in de vlam; de toevoertijd zou dus kleiner of gelijk moeten zijn aan de verblijftijd. Zonder formules gehanteerd te hebben kan nu de "ideale procesvoorwaarde" met betrekking tot fase II worden gedefinieerd als: $t_a \leq t_s \leq t_d$.
Of anders gezegd: De verblijftijd van een spuitdeeltje in de vlam moet zo worden gekozen, dat de vlam de gelegenheid heeft om de gewenste hoeveelheid warmte met een zodanige intensiteit (= hoeveelheid per seconde) toe te voeren aan het deeltje, dat er geen oververhitting kan plaatsvinden.

Fase III
Gedurende fase III worden de kinetische en thermische energie die het spuitdeeltje op zijn vlucht van het pistool naar het substraat heeft verzameld overgedragen aan het substraat. De detailprocessen die zich daarbij afspelen zijn nogal gecompliceerd van aard. Samengevat: de thermische interactie van een spuitdeeltje met het substraat is naast een aantal nevenvoorwaarden eveneens afhankelijk van enkele eigenschappen van de spuitdeeltjes, onder andere:
- de afmetingen;
- de soortelijke massa;
- de warmtegeleidende eigenschappen;
- de warmtecapaciteit;
- het smeltpunt.

3.3 *Interactie van het spuitmateriaal met het werkstuk, opbouw van de laag*

In figuur 3.2 is een aantal hoofdtypen van gedeformeerde deeltjes weergegeven. De uiteindelijke vorm is sterk afhankelijk van de warmte-inhoud die het deeltje bezit op het moment van de botsing. We onderscheiden 4 typen deeltjes.

Type 1
Type 1 beschrijft de vorm van een roestvast staaldeeltje dat verhit is tot een temperatuur net onder het smeltpunt. De deformatie is onvolledig, contact treedt op in het centrale gedeelte van het deeltje.

Type 2
Type 2 beschrijft de gedeformeerde vorm van molybdeen met een warmte-inhoud net onder en net boven het smeltpunt. De deformatie is hierbij volledig en door de hoge warmte-inhoud van het deeltje treedt over een groot deel van het contactvlak diffusiebinding op. Men kan stellen dat een dergelijke lamel door een diffusielas verbonden is met het substraat.
Wanneer de warmte-inhoud van een spuitdeeltje wordt opgevoerd tot enkele honderden graden boven zijn smeltpunt, treden gedeformeerde vormen op zoals omschreven door type 3 en 4.

Type 3
Type 3 leidt voornamelijk tot gedeeltelijke verbinding door diffusie.

Type 4
Type 4 leidt tot gedeeltelijke wrijvingslassen tussen deklaag en substraatmateriaal. Tevens is bij type 4 een sterke deformatie van het substraat waarneembaar. Karakteristiek voor type 1, 3 en 4 is dat er slechts een gedeeltelijk contact bestaat tussen het gedeformeerd spuitdeeltje en het substraat.

Reactiedeeltje met substraat

De in figuur 3.2 geïllustreerde botsverschijnselen treden op bij gepolijste substraten, aldus aangevend dat door de combinatie van voldoend hoge kinetische en thermische energie van het spuitdeeltje een substraat mechanisch zo gedeformeerd kan raken, dat het een uitstekende ondergrond vormt voor de navolgende spuitdeeltjes. Metaal- of legeringsdeeltjes die met een gebrek aan thermische of kinetische energie op het substraat botsen, zullen in het algemeen terugkaatsen en niet tot hechting komen. Voor deze categorie spuitmaterialen geldt dat de combinatie van een hoge thermische energie met een relatief lage kinetische energie succesvol kan worden toegepast. Daarentegen voert een combinatie van hoge kinetische energie met een lage thermische energie niet tot de opbouw van een voldoende sterke laag. Ditzelfde beeld is van toepassing op keramische spuitmaterialen zoals zirkoonoxyde en aluminiumoxyde.
Anders wordt het beeld voor spuitmaterialen die een harde fase bevatten zoals wolfraamcarbiden. Dit type materiaal wordt bij voorkeur aangebracht met een hoge kinetische energie en een matige thermische energie. De hoge kinetische energie zorgt voor sterke mechanische deformaties en aldus voor bindingen met de ondergrond, terwijl door de lage thermische energie wordt voorkomen dat het wolfraamcarbide (of een andere harde verbinding) chemisch uiteenvalt of te sterk reageert met de omgevende metaalelementen. Het is voor dit type spuitmateriaal dat de, deels nog in ontwikkeling zijnde, hoge druk verbrandingsprocessen in toenemende mate met succes worden toegepast.

3.4 *Invloed van de uitvoering van het spuiten*

In het voorgaande zijn enkele fysische karakteristieken van thermische spuitprocessen omschreven. Evenzo zijn er karakteristieke kenmerken aan te geven die in direct verband staan met de gebruikte techniek.

3.4.1 *Spuitafstand*

Als eerste kan worden genoemd de vrije afstand tussen het spuitpistool en het substraat. Deze spuitafstand wordt bewust in stand gehouden om de warmtestroom van de vlam of het plasma naar het substraat te beperken en om de spuitdeeltjes snelheid en temperatuur te laten opbouwen. In tegenstelling tot de lasprocessen wordt de thermische vlamenergie niet gebruikt om het substraat te verhitten. Zoals reeds besproken, moet er worden gestreefd naar een zo gering mogelijke uitzetting van het substraat. Bij een geringe uitzetting is het mogelijk om deklagen van een geheel andere materiaalsoort dan het substraatmateriaal aan te brengen.

3.4.2 *Poederinjectie in de spuitvlam*

Een belangrijk specifiek kenmerk van opgespoten lagen volgt uit de toegepaste manier van poederinjecteren in de spuitvlam. In figuur 3.1 is dit aangegeven als een zijdelingse injectie, zoals gebruikelijk bij het plasmaspuiten. Door dit zijdelings injecteren ontstaan er in feite drie elkaar overlappende materiaalstromen naar het substraat.

3.4.2.1 *Grove deeltjes*

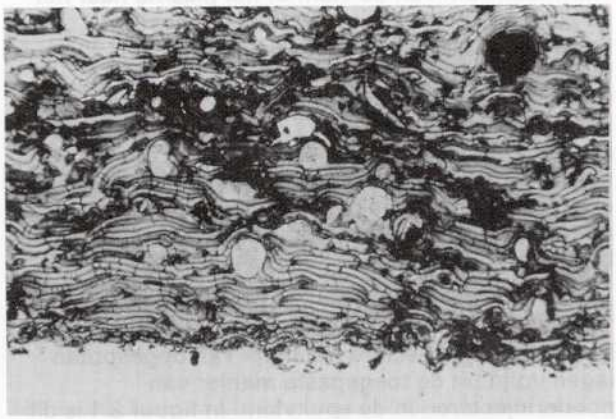
Grove spuitdeeltjes zullen de neiging hebben om door het plasma heen te schieten en aan de bovenzijde van de spuitbaan tot hechting te komen. Deze deeltjes zijn als onvolkomen gesmolten deeltjes in de deklaag duidelijk herkenbaar.

3.4.2.2 *Poederdeeltjes in het centrum van de boog of de vlam*

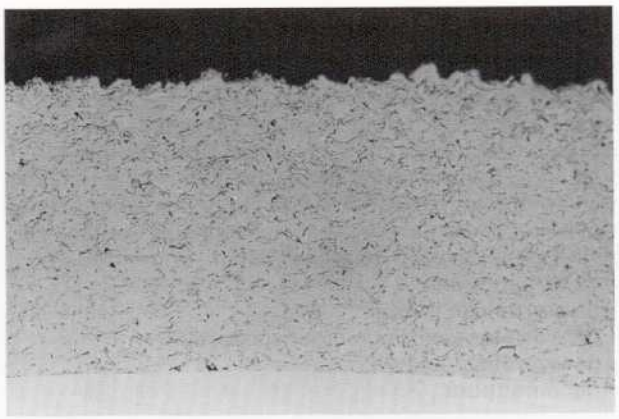
Een tweede deel van de geïnjecteerde poederdeeltjes zal terechtkomen in het centrum van het plasma. Zij hebben de langste verblijftijd in het plasma en zullen daardoor optimaal worden doorgewarmd. Deze deeltjes krijgen als deklaagelement, mits met de juiste spuitparameters wordt gewerkt, een zeer kenmerkende lamellaire vorm. Dit centrale deel van een spuitbaan vertoont een grote mate van dichtheid en homogeniteit.

3.4.2.3 *Poederdeeltjes aan de rand van de boog of de vlam*

Een derde deel van het geïnjecteerde materiaal zal niet kunnen binnendringen in het plasma wegens een gebrek aan injectie-impuls. Dit gebrek treedt op voor de fijne fractie van het spuitpoeder. De fijne deeltjes worden in de turbulente mengzone van het plasma en de omringende lucht meegenomen naar het substraat, waar ze als zwaar geoxydeerde, onregelmatig gevormde, donkergekleurde elementen aan de onderzijde van de spuitbaan herkenbaar zijn.
Een volgende spuitbaan zal de vorige overlappen. Zo ontstaat er een gemengde structuur van de deklaag, waarin onvolledig gesmolten grove delen, naast lamellaire delen en sterk geoxydeerd fijne delen voorkomen. Tevens zullen er poriën aanwezig zijn, speciaal in de buurt van de grove delen.
De structuur van een thermisch gespoten deklaag is derhalve niet gelijk aan die van bijvoorbeeld gesmeed staal. In figuur 3.3 wordt een bewust verkeerd gespoten molybdeenlaag getoond om de verschillende structuurelementen die kunnen optreden te illustreren. Figuur 3.4 vertoont de structuur van een goed gespoten FeCrAlY-laag, waarbij speciale aandacht is besteed aan de centrale injectie van het poeder.



figuur 3.3 Bewust verkeerd gespoten Mo-laag ter illustratie van optredende structuurelementen



figuur 3.4 Goed gespoten FeCrAlY-laag

Een poreuze spuitlaag kan uitstekend functioneren onder tribotechnische omstandigheden waarbij een smeermiddel wordt toegepast. De poriën vormen smeermiddelreservoirs die het smeermiddel onder verhoogde contactdruk vrijgeven, waardoor metaal-metaalcontact van de over elkaar glijdende machine-elementen wordt voorkomen.
Een deklaag met de structuur van figuur 3.4 kan worden ingezet als corrosiebestendige deklaag.

3.5 *Dampontwikkeling*

Door oververhitting of oxydatie kan een thermisch spuitproces vergezeld gaan van een hevige dampontwikkeling. Natuurlijk is deze dampvorming ook sterk afhankelijk van de materiaalsamenstelling. De damp wordt door de spuitgassen ten dele naar het substraat gevoerd waar hij condenseert. Aldus ontstaat er op het zorgvuldig gereinigd substraatoppervlak een dunne film, die als (niet onoverkomelijke) barrière fungeert voor de navolgende spuitdeeltjes.
Deze problemen kunnen soms effectief worden bestreden door het spuitproces uit te voeren in inerte gaskamers of onder vacuüm. Het spuiten onder gecontroleerde atmosfeer in afgesloten kamers vindt op ruime schaal toepassing bij het vervaardigen van machine-elementen voor de luchtvaartindustrie.
Metallische deklagen die onder uitsluiting van de luchtinwerking zijn gespoten, vertonen een goede ductiliteit. Enige porositeit is ook hier niet altijd te vermijden.
De problemen van verbrossing en oxydatie kunnen voor bepaalde toepassingen eveneens worden opgelost onder atmosferische spuitomstandigheden door het gebruik van insmeltlegeringen. Deze materialen op nikkel- of kobaltbasis bevatten desoxyderende elementen, zoals borium en silicium, die door zelf te oxyderen verhinderen dat de overige legeringselementen worden aangetast.
Deze deklagen worden na het opspuiten door een extra warmtebehandeling bij temperaturen van 1050-1150°C ingesmolten. Na afkoelen is de deklaag homogeen en sterk als een smeedlegering. De legeringen zijn in hoofdstuk 2 aan de orde gekomen. In het geval van toepassing van insmeltlegeringen is er geen sprake meer van "koud" thermisch spuiten.

Hoofdstuk 4

Keuzecriteria thermische spuitprocessen en -materialen

4.1 Technische overwegingen

Voorbeelden van toepassingen van de thermische spuitprocessen zijn in hoofdstuk 7 weergegeven. Daaruit valt op te maken dat er drie belangrijke redenen zijn voor het gebruik van een met een thermisch spuitproces op te brengen deklaag. Dat zijn slijtage (wrijving), corrosie en hoge temperatuur. Hiervan is slijtage de belangrijkste. Een wat specifiek aspect is het toepassen van slijtwillige (abradable) opgespoten lagen. Deze worden onder andere gebruikt in vliegtuigturbinemotoren en dienen voor het aanpassen op elkaar van de statische en de bewegende delen in de turbine.
Dikwijls zijn combinaties van de genoemde omstandigheden aan de orde, waardoor een keuze van het op te brengen materiaal een zorgvuldige analyse noodzakelijk maakt.
Om tot de juiste keuze van een thermisch spuitproces te komen, is het van belang allereerst de bedrijfscondities te analyseren, vervolgens te komen tot de juiste definitie van de deklaag, waaruit dan de keuze van het spuitmateriaal, draad of poeder, volgt en waar dan vervolgens de keuze van het thermisch spuitproces uit voortvloeit.

- Corrosie
  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.
- Slijtage en wrijving
  Bij slijtage en wrijving zijn altijd minimaal twee oppervlakken betrokken. Daarom zijn het geen oppervlakteparameters maar procesparameters. Bij deze processen is de relatieve verplaatsing van de oppervlakken ten opzichte van elkaar van invloed op het proces.
- Hoge temperatuur
  De thermische belastingen van oppervlakken wordt tegenwoordig steeds zwaarder. Omdat het rendement van energetische processen toeneemt met het verschil tussen de hoogst en laagst optredende temperatuur, worden steeds hogere procestemperaturen gekozen.

Dikwijls komen ook combinaties van (ook andere) omstandigheden voor. Dat zijn bijvoorbeeld:
- corrosie en slijtage;
- corrosie en hoge temperaturen;
- slijtage en hoge temperaturen;
- slijtage en vermoeiing.

Aangezien slijtage één van de belangrijkste redenen is om oppervlakken van een deklaag te voorzien, zal een aantal slijtageverschijnselen nader worden omschreven.

4.1.1 *Slijtagevormen*

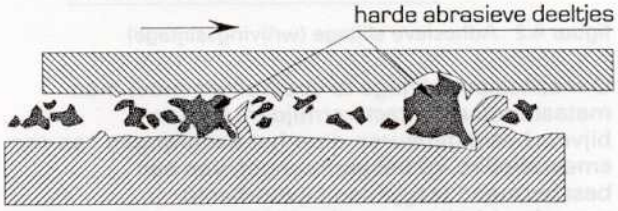
Slijtage is als volgt te definiëren:

Slijtage is een ongewenste aantasting van materiaal aan het oppervlak als gevolg van een mechanische inwerking, bijvoorbeeld glijdend of stotend contact, al dan niet met chemische of thermische beïnvloeding.

De slijtagevormen kan men als volgt rangschikken:
- abrasieve slijtage;
- adhesieve slijtage;
- vermoeiingsslijtage;
- erosieve slijtage.

4.1.1.1 *Abrasieve slijtage*

Deze slijtagevorm wordt veroorzaakt door harde deeltjes (metaal, stof, oxyden, zand, en dergelijke) die tussen tegen elkaar wrijvende vlakken dringen en aldaar groeven veroorzaken.
Ook kan abrasieve slijtage worden veroorzaakt door een ruw en hard oppervlak dat over een zachter oppervlak beweegt. De ruwe laag veroorzaakt groeven in het zachtere metaal en het daardoor afgeschuurde materiaal, in de vorm van kleine abrasieve deeltjes, veroorzaakt verdere slijtage. In figuur 4.1 is het mechanisme van abrasieve slijtage schematisch weergegeven.



figuur 4.1 Abrasief slijtage (schuurslijtage)

Abrasieve slijtage is dus een ongewenst verspaningsproces en wordt veroorzaakt door het grote verschil in hardheid van de abrasieve deeltjes (veelal mineralen) en het metaal van het werkstuk. Praktische voorbeelden waarbij abrasieve slijtage een rol speelt, zijn onder andere pakkingbussen van pompen, remtrommels, kabelschijven, afdichtingsplaatsen voor O-ringen, koppelingplaten en mechanische afdichtingen.

De weerstand tegen abrasieve slijtage neemt toe met de hardheid van de ondergrond. Afhankelijk van het abrasieve medium speelt ook de taaiheid een rol. Ingesmolten spuitlagen met een aandeel van 50% wolfraamcarbide koppelen een hoge abrasiebestendigheid aan een relatief hoge mate van plastisch deformatievermogen. In het algemeen worden voor objecten die aan abrasieve slijtage onderhevig zijn harde spuitlagen toegepast.

De beste resultaten bij fijnkorrelige abrasieve deeltjes, zoals die kunnen voorkomen op de loopvlakken van O-ringafdichtingen, worden bereikt met plasma gespoten keramische deklagen.
Bij zwaardere belasting op bijvoorbeeld kabelschijven voor staaldraad, plunjerstangen voor ertstransport, stopbuspakkingplaatsen van zandpompen, slijtvlakken van betonboren en transportrollen in de staalindustrie, worden bij voorkeur ingesmolten lagen met een hardheid van Rc 60 toegepast.

4.1.1.2 *Adhesieve slijtage*

Adhesieve slijtage, ook wel wrijvingsslijtage genoemd, ontstaat wanneer twee metaalvlakken tegen elkaar glijden en materiaaloverdracht plaatsvindt op basis van adhesie tussen de twee partnermaterialen. Voorwaarde voor het optreden van dergelijke intermetallische verbindingen is zuiver metaal-metaalcontact én beweging tussen de vlakken. De aantrekkingskrachten van de twee tegen elkaar wrijvende metaaloppervlakken (adhesie) speelt hierbij een belangrijke rol. In de praktijk is één van de primaire oorzaken een stagnatie in de smering of een verkeerde keuze van het smeermiddel.
In figuur 4.2 is schematisch het mechanisme weergegeven.

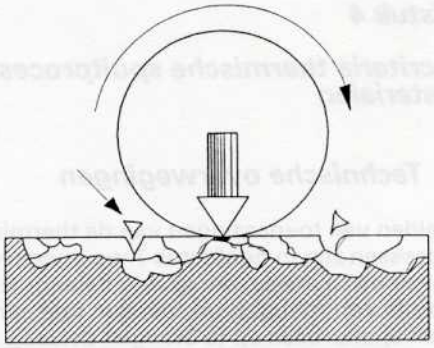
figuur 4.2 Adhesieve slijtage (wrijvingsslijtage)

Om adhesieve slijtage te voorkomen moet men metaal-metaalcontact vermijden. Dit kan bijvoorbeeld gebeuren door het aanbrengen van een smeeroliefilm, of het aanbrengen van een beschermend laagje van bijvoorbeeld metaalverbindingen zoals nitriden, oxyden en carbiden (nitreren, hardverchromen, cementeren).
De meeste vlamgespoten lagen hebben een typische microporeuze lamellaire structuur met insluitingen van oxyden en carbiden, waardoor metaal-metaalcontact wordt vermeden. Microporositeit zorgt voor opname van het smeermiddel en geeft een lage wrijvingscoëfficiënt, waardoor er betere loopeigenschappen ontstaan.
Spuitlagen voor zachte lagervlakken zoals van brons, monel, witmetaal of tin hebben het vermogen om abrasieve deeltjes, zoals stof en vuil, in te bedden. Daarnaast bezitten zij voldoende plastisch deformatievermogen voor een geometrische aanpassing van de loopvlakken.
De harde spuitlagen voor astappen, rondsels, krukassen, spindels, zuigerveren en dergelijke zijn olieopnemend en onder kritische omstandigheden zelfsmerend. Zij hebben een lage wrijvingscoëfficiënt en een hoge drukvastheid. Een hoge hardheid alleen is voor deze slijtagevorm van minder belang.

4.1.1.3 *Vermoeiingsslijtage*

Herhaalde wisselende belasting veroorzaakt een regelmatig terugkerende druk- en schuifspanning onder het oppervlak. Door vermoeiing ontstaan dan microscheuren evenwijdig aan dit oppervlak, waardoor deeltjes uit het materiaal worden losgescheurd en putjes achterlaten. Figuur 4.3 geeft het mechanisme weer.

Er wordt onderscheid gemaakt bij oppervlakte-vermoeiing ontstaan door een herhaaldelijk

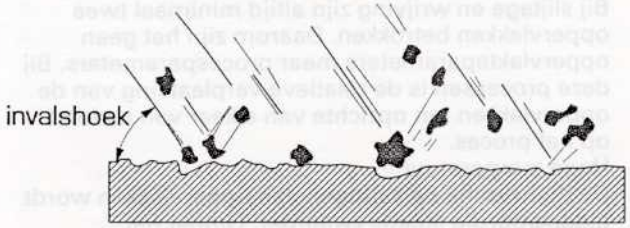


figuur 4.3 Oppervlaktevermoeiing

glijdende, rollende of stotende beweging.
De beste bescherming tegen een rollende of stotende belasting wordt gevormd door ingesmolten lagen op basis van nikkel/chroom of cobalt/nikkel/chroom.
Tenslotte kan cavitatie (putvorming) ontstaan door oppervlaktevermoeiing in een wervelende vloeistof eventueel gecombineerd met de invloed van een corrosief medium.

4.1.1.4 *Erosieve slijtage*

Erosie ontstaat tengevolge van een stroom van gas of vloeistof die deeltjes met zich meevoert en die met kracht over een oppervlak strijkt of er op inslaat. Als de hoek van inslag kleiner is dan ongeveer 45 graden, is de mechanische actie vergelijkbaar met abrasie. Is de hoek van inslag groter dan 45 graden, dan ontstaat er voornamelijk vermoeiingsslijtage en wordt taaiheid de meest belangrijke eigenschap. De mate van erosie is dus sterk afhankelijk van de soort en grootte der meegevoerde deeltjes en de hoek waaronder het materiaal wordt getroffen. In figuur 4.4 is het principe van erosie weergegeven.



figuur 4.4 Erosie van het oppervlak

In het algemeen komen harde, schuurbestendige spuitlagen het meest in aanmerking bij erosie veroorzaakt onder een hoek tot 45 graden.
Bij een erosieve werking onder een hoek van 45 tot 90 graden kan beter een taaie en zachtere spuitlaag gekozen worden, omdat een dergelijke laag in staat is schokken te absorberen.

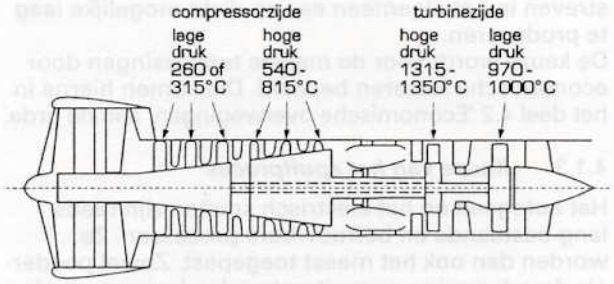
4.1.1.5 *Slijtwillige lagen*

Door toepassing van de plasmaspuittechniek worden kunststoffen op metalen als lagen aangebracht op die plaatsen in een turbine waar slijtwillige lagen gewenst zijn, zogenaamde 'abradable' deklagen.
Deze groep van spuitlagen zijn speciaal ontwikkeld om zich aan te passen aan de ongewenste en verspanende werking van metaalcontact tussen een

statisch en bewegend machine-onderdeel.
Het toepassingsgebied ligt voornamelijk in de afdichtingsplaatsen van gasturbines, de ruimte tussen stator en rotor, of als beschermende laag op de tips van turbinebladen. Het zijn plaatsen waar een optimale gasafdichting moet plaatsvinden en waar door aanlopen een ernstige beschadiging kan ontstaan.
Het toepassen van deze deklagen in de turbine-industrie draagt bij tot verhoging van het turbinerendement en een verlaging van de bedrijfskosten zoals van onderhoud, materiaal en brandstof.
Figuur 4.5 geeft de schematische voorstelling weer van een gasturbine, waar deze afdichtingsplaatsen met pijltjes zijn gemarkeerd. Materialen die worden toegepast zijn: polyester, aluminium-polyester, aluminium-brons-polyester, nikkel-grafiet materialen (75/25 en 85/15 verhoudingen), de koper-zinkzilver materialen (38/32/30) en puur aluminum (99,0).

4.1.2 *Keuze van opspuitmaterialen*

Hierboven zijn aanwijzingen gegeven welke opspuitmaterialen in bepaalde slijtage-omstandigheden moeten worden gekozen. In tabel 4.1 zijn aanwijzingen gegeven welke opspuitmaterialen onder bepaalde



figuur 4.5 Met pijltjes aangegeven plaatsen waar in een turbine slijtwillige lagen zijn opgespoten

bedrijfsomstandigheden kunnen worden gekozen. De meeste daarvan zijn alleen in poedervorm verkrijgbaar.

Wanneer de eisen in verband met de toepassing zijn vastgelegd en het meest geschikte type opspuitmateriaal is gekozen, dan volgt de keuze voor het spuitproces. Primair volgt dan een keus gebaseerd op de vorm waarin het op te spuiten materiaal voorhanden is; draad of poeder. Daarna is de vereiste kwaliteit van belang. Met name de dichtheid van de deklaag speelt hierbij een rol. Niet bij alle toepassingen is een zo porievrije deklaag, zoals bij lagermaterialen, van belang. Toch is het

tabel 4.1 Aanwijzigingen voor de keuze van opspuitmaterialen

Functie van de deklaag	Mogelijke opspuitmaterialen	Eigenschappen*
Tussenlaag	Mo 99,9 Ni-Cr 80-20 Ni-Al 95-5 Ni-Al 80-20 NiCr-Al 95-5 NiCrAlY	Toenemende oxydatie- en temperatuurbestendigheid
Bescherming tegen slijtage	Staaltypen NiCrBSi Co-basis WC-Co WC-CoCr Cr_2C_2-Ni Cr_2C_2-NiCr Cr_2C_2-MCrAlY	Toenemende hardheid. WC-CoCr/Cr_2C_2-NiCr zijn ook bij hogere temperaturen oxydatiebestendig
Glijdende en wrijvende slijtage	Sn-SbCu 7,5-3,5 Cu-AlFe 9-1 Mo 99,9 Mo/NiCrBSi WC-Co/NiCrBSi WC-Co	Toenemende weerstand tegen slijtage, maar afnemende wrijvingseigenschappen
Bescherming tegen corrosie	Al 99,0 Zn 99,9 Zn-Al 15 Roestvast staal Ni-Cr 80-20 Al_2O_3 Al_2O_3-TiO_2 Cr_2O_3	Toenemende bescherming tegen corrosie. Materialen hebben soms geheel verschillende toepassingen. De keuze is daarom niet verwisselbaar voor één bepaalde toepassing
Bescherming tegen hoge temperaturen	ZrO_2-CaO 95-5 ZrO_2-MgO 80-20 ZrO_2-Y_2O_3 80-20 ZrO_2-Y_2O_3 93-7	Toenemende hitte- en thermische schokbestendigheid

* Zie voor details 2.3 voor draden en 2.4 voor poeders

streven in het algemeen een zo dicht mogelijke laag te produceren.
De keuze wordt voor de meeste toepassingen door economische factoren bepaald. Die komen hierna in het deel 4.2 'Economische overwegingen' aan de orde.

4.1.3 *Keuze van het spuitproces*

Het autogeen en het elektrisch spuiten zijn reeds lang bestaande en betrouwbare processen. Ze worden dan ook het meest toegepast. Zowel poeder- als draadvormige opspuitmaterialen kunnen worden verwerkt. Wanneer de lagen niet worden ingesmolten, zal altijd rekening moeten worden gehouden met een bepaald percentage (minstens 5%) poreusheid.
Met het plasmaspuiten zijn dichtere lagen mogelijk, maar de kosten voor de aanschaf van de apparatuur liggen beduidend hoger en met de gangbare installaties kan alleen poeder worden verwerkt.
Deklagen van een hoge kwaliteit kunnen worden verkregen met het snel populairder wordende HVOF-spuiten. Voor toepassingen waar een bijzonder hoge dichtheid van de deklaag is vereist, zijn processen ontwikkeld zoals het detonatie- en het lagedruk plasmaspuiten. Ze worden echter sporadisch toegepast.
Uit het bovenstaande blijkt dat de keuze voor het spuitproces toch niet zo ingewikkeld is als het op het eerste gezicht lijkt. Factoren als de beschikbaarheid van apparatuur en kennis van het gebruik ervan in de onderneming, zijn van groot belang en bepalen meestal de keuze.

Resumerend:
De keuzecriteria voor de thermische spuitprocessen zijn niet in een paragraaf volledig te omschrijven. In dit verband zijn van belang:
1. Alle bedrijfsomstandigheden met betrekking tot de probleemanalyse (slijtagevorm, basismateriaal, bedrijfstemperatuur, toerental, druk e.d.);
2. Alle mechanische en fysische eigenschappen van de deklaag (hardheid, porositeit, dichtheid, hechting, temperatuurbestendigheid, verspaanbaarheid e.d.);
3. Alle mechanische en fysische eigenschappen van het spuitmateriaal (korrelconfiguratie, draadeigenschappen, rendement, verspuitbaarheid, e.d.);
4. Alle procesparameters en de invloed hiervan op de deklaag (gassoort, gasstroom, spuitafstand, toerental, voeding, spuittemperatuur, e.d.).

Kortom een scala van criteria zijn bepalend voor de keuze van het thermisch spuitproces. Een keuzecriterium aan de hand van economische aspecten, technische (praktische) aspecten is aan te geven en geschikt om enige duidelijkheid omtrent de keuze van het proces te verschaffen.
Onder de economische aspecten vallen onder andere de materiaal- en de procesprijs. Hierover wordt onder 4.2 'Economische overwegingen' de nodige basisinformatie gegeven.

4.2 *Economische overwegingen*

Het behandelen van economische overwegingen in het kader van een voorlichtingspublikatie herbergt enige moeilijkheden in zich, indien over concrete praktische aangelegenheden gesproken gaat worden. Prijzen zijn bijvoorbeeld aan veranderingen onderhevig en kunnen over een langere periode belangrijk veranderen. Gezien de prijsontwikkeling in de tijd, zullen de gebruikte kosten voorlopig nog enige tijd te hanteren zijn.
Kosten zijn echter niet alleen afhankelijk van die voor de aanschaf van de primair benodigde apparatuur en de te gebruiken materialen. Behalve de aanschaf van basisapparatuur is als aanvulling een scala van hulpapparatuur ter beschikking. Afzuiging- en manipulatie-apparatuur kunnen bijvoorbeeld niet geringe kostenposten vormen. Verschillen kunnen ook ontstaan door het niveau van het personeel en hun beloning.
Wel moet men zich realiseren, dat arbeidsloon één van de grootste kostenposten is geworden en dat een duurder lijkende aanschaf toch economisch kan zijn. In 1955 was het arbeidsloon circa *f* 3,— per uur en 18-8 roestvast staaldraad circa *f* 15,— per kg. Op dit moment zijn de kosten respectievelijk circa *f* 60,— en *f* 30,—. Met andere woorden, het arbeidsloon is met een factor 20 gestegen en die van het opspuitmateriaal maar met een factor 2!
De boodschap is dan ook duidelijk. Bij gelijke kwaliteit, zal in de meeste gevallen moeten worden gekozen voor het proces met de hoogste opbrengst (op het produkt) per tijdseenheid.

4.2.1 *Kostenposten*

Bij het opspuiten zullen de volgende aspecten een rol spelen en men zal zich goed moeten realiseren wat hun kostenaandeel daarin is:
- voorbereidende werkzaamheden: reinigen, machinaal bewerken, gritstralen en afplakken;
- opspuitapparatuur: componenten van de opspuitapparatuur, reserve-onderdelen, opspanapparatuur, branders e.d. voor voorwarmen en insmelten, kosten voor bescherming van de operators en de omgeving;
- verbruiksmaterialen: poeder, draad, gassen, perslucht, straalmiddelen, filters, koelwater, mondstukken voor spuitpistolen, elektroden (plasma en elektrisch spuiten), ontvettingsmiddelen en demi-water, afplakmateriaal, dichtingsmiddelen (sealers) voor de opgespoten lagen, elektrische energie;
- arbeidsloon: voor-en nabehandeling, opspuiten;
- nabewerkingsapparatuur: beitels, slijpschijven;
- gezondheid: afzuig- en luchtbehandelings-apparatuur, lawaaibestrijding;
- milieu: afvalstoffenverwerking van het spuiten, reiniging van filtersystemen.

Wanneer het om loonspuitbedrijven gaat, zullen al deze kosten een rol spelen. Is het opspuiten een deel van een eigen produktie, dan zullen bewerkingsmachines ook voor ander soort opdrachten kunnen worden gebruikt.
Veiligheid, gezondheid en milieuvoorschriften zullen een steeds omvangrijker kostenpost gaan vormen.
Opspuiten kan veel lawaai geven en niet al het verspoten materiaal komt op het werkstuk terecht. Dat laatste is mede afhankelijk van de vorm van het werkstuk, op kleine, ronde vormen gaat meer verloren dan op grote vlakke platen.
Voor het opslaan van spuitmaterialen zijn soms

geconditioneerde ruimten nodig. Dat geldt zowel voor poeders als voor draden. Vocht kan aanleiding zijn tot het slecht lopen en het oxyderen van poeders en draden.
Indien veel wordt gespoten, is al gauw een flessenbatterij met distributieleiding, alsmede de daarbij behorende veiligheidsvoorzieningen voor opslag noodzakelijk.

4.2.2 *Investeringskosten apparatuur*

Het is slechts mogelijk indicaties van kosten met soms een bepaalde (ruime) spreiding te geven. De bedoeling van deze opsomming is duidelijk te maken dat men er niet is met de aanschaf van de opspuitapparatuur zelf.

Kosten van apparatuur voor:
- autogeen draadspuiten: ƒ 15.000 à ƒ 20.000;
- autogeen poederspuiten: ƒ 12.000 à ƒ 17.000;
- apparatuur voor het insmelten: ƒ 2.000 à ƒ 6.000;
- elektrisch spuiten: ƒ 30.000 à ƒ 60.000;
- plasmaspuiten: ƒ 120.000 à ƒ 450.000. De hoogte wordt bepaald door de mate van automatisering;
- hogesnelheidsspuiten: ƒ 80.000 à ƒ 160.000;
- opspannen van het werkstuk. Dit kan variëren van enkele duizenden tot ƒ 100.000;
- afzuiging bij het werkstuk, spuitcabines. In een eenvoudige uitvoering ƒ 20.000 à ƒ 30.000. Voor het afzuigen via een filtersysteem kunnen de kosten variëren van ƒ 60.000 à ƒ 200.000;
- perslucht: ƒ 5.000 à ƒ 40.000.

4.2.3 *Gas- en energiekosten*

De kosten voor gassen voor het spuiten zijn afhankelijk van de jaarlijkse hoeveelheid die wordt afgenomen. De hieronder genoemde prijzen zijn een gemiddelde van een loonspuitbedrijf (stand 1992):
Prijzen per m³
- Zuurstof: ƒ 2,50
- Stikstof: ƒ 2,25
- Waterstof: ƒ 2,25
- Argon: ƒ 3,25
- Perslucht: ƒ 0,05

Prijzen per kg
- Acetyleen: ƒ 13,50 (ƒ 11,50 per m³)
- Propaan: ƒ 2,50
- Propyleen (HVOF spuiten): ƒ 5,25

De kosten voor een kWh variëren van 15 tot 23 cent, gemiddeld 20 cent.

In tabel 4.2 zijn voor het spuiten van roestvast staal voorbeelden gegeven van de energiekosten per uur voor een viertal technieken.

4.2.4 *Kosten opspuitmaterialen*

Teneinde een indruk te krijgen van de kosten van opspuitmaterialen, zijn in tabel 4.3 richtprijzen per kg van een aantal typen weergegeven. De getallen moeten niet worden gebruikt voor een prijscalculatie. Voor nauwkeurige prijzen dient informatie bij de leverancier te worden ingewonnen.

tabel 4.3 Richtprijzen per kg van een aantal draden en poeders

Draad	ƒ/kg	Poeder	ƒ/kg
Ni-Al 80-20	90,—	Ni-Al 95-5	75,—
Chroomstaal	21,—	Chroomstaal	30,— tot 60,—
Roestvast staal	26,—	Roestvast staal	30,— tot 60,—
Brons	41,—	Ni-CrBSi	50,— tot 60,—
Zink	7,—	Ni-CrBSi/WC	110,— tot 150,—
Aluminium	13,—	W_2C	175,—
Molybdeen	123,—	W_2C, HVOF	330,—
		WC-Co 88-12	330,— tot 400,—
		Cr_3C_2	80,— tot 100,—
		Cr_3C_2-Ni 83-17	80,— tot 100,—
		Al_2O_3-TiO_2 87-13	58,—
		Cr_2O_3 99,9	110,— tot 150,—
		ZrO_2-MgO 75-25	78,—

4.2.5 *Berekening van de produktiekosten*

4.2.5.1 *Welke kosten worden behandeld*

Het hierna samengevatte overzicht voor het berekenen van de produktiekosten heeft betrekking op dat deel van de kosten dat direct in relatie staat tot het opspuiten zelf. Kostendelen van andere aard

tabel 4.2 Voorbeelden van energiekosten per uur voor het spuiten van roestvast staal*

		Lucht en gas	Elektriciteit	Totaal/uur
Autogeen poederspuiten	(1)	ƒ 13,75	ƒ -,—	ƒ 13,75
Autogeen draadspuiten	(2)	ƒ 27,75	ƒ -,—	ƒ 27,75
Elektrisch boogspuiten	(3)	ƒ 0,70	ƒ 3,—	ƒ 3,70
Plasmaspuiten	(4)	ƒ 5,40	ƒ 4,90	ƒ 10,30

1. Autogeen poederspuiten: 6 kg/uur
   zuurstof: 2 m³ x f 2,50 per m³ = ƒ 5,—/uur
   acetyleen: 1,0 m³ x ƒ 11,50 per m³ = ƒ 11,50/uur
   Totaal ƒ 16,50/uur
   Voor 5 kg/uur: 5/6 x ƒ 16,50 = ƒ 13,75/uur

2. Autogeen draadspuiten: 5 kg/uur
   zuurstof: 3 m³ x f 2,50 per m³ = ƒ 7,50/uur
   acetyleen: 1,5 m³ x ƒ 11,50 per m³ = ƒ 17,25/uur
   lucht: 60 m³ x f 0,05 per m³ = ƒ 3,00/uur
   Totaal ƒ 27,75/uur

3. Elektrisch boogspuiten: 5 kg/uur
   elektriciteit: 3,5 kWh x ƒ 0,20 = ƒ 0,70/uur
   lucht: 60 m³ x f 0,05 per m³ = ƒ 3,00/uur
   Totaal ƒ 3,70/uur

4. Plasmaspuiten: 6,5 kg/uur
   stikstof: 2,6 m³ x ƒ 2,25 per m³ ƒ 5,85/uur
   waterstof: 0,5 m³ x ƒ 2,25 per m³ ƒ 1,15/uur
   elektriciteit: 32 kWh x ƒ 0,20 ƒ 6,40/uur
   Totaal ƒ 13,20/uur
   Voor 5 kg/uur: 5/6,5 x ƒ 13,20 = ƒ 10,15/uur

* Voor het mogelijk maken van een vergelijking zijn de getallen gebaseerd op een opbrengst van 5 kg per uur. De bedragen zijn alleen als een indicatie bedoeld. Voor koeling van werkstukken kan een grote hoeveelheid perslucht noodzakelijk zijn. Deze kosten zijn niet in rekening gebracht.

zullen niet worden beschouwd. Hiertoe behoren afschrijving van machines, randapparatuur, na- en voorbewerkingskosten, arbeidsloon enz. Dat zijn typisch bedrijfsgebonden gegevens en het meenemen van deze kostendelen behoort tot het normale calculeren van produktiekosten.
Het is wel de bedoeling een inzicht te geven waaruit de spuitkosten zijn opgebouwd en een systematiek te beschrijven hoe kosten kunnen worden berekend.
Voor het berekenen van opspuitkosten moet in de eerste plaats worden gekeken naar de hoeveelheid op te spuiten materiaal. Van belang is te weten hoeveel materiaal uiteindelijk op het werkstuk terechtkomt. Uitgegaan kan worden van een eenvoudige oppervlakteberekening en het te verwachten spuitrendement. Dat is voornamelijk een ervaringskwestie.
Opspuitmateriaal gaat verloren door:
- het spuiten naast het werkstuk, door uitsparingen of op de afgeplakte delen (werkstukrendement);
- het verloren gaan van materiaal gedurende de overgang van het druppeltje van het spuitpistool naar het werkstuk (depositierendement).

Het totale rendement zal in de praktijk tussen ongeveer 50 en 80% liggen. Dat betekent dat in ongunstige omstandigheden soms tweemaal zoveel poeder nodig is als theoretisch wordt berekend. Ook is de dichtheid van een opgespoten laag, behalve na het insmelten, zelden 100%. Er is altijd sprake van porositeit, die kan variëren van 1 tot 10%. leveranciers kunnen voor hun produkten hierover informatie verschaffen.

4.2.5.2 *Het bepalen van de hoeveelheid op te spuiten materiaal*

Rekening houdend met de te verwachten dichtheid is voor een aantal materialen de benodigde hoeveelheid opspuitmateriaal in kg per m² voor 0,1 mm laagdikte bepaald. Deze zijn in tabel 4.4 weergegeven.

tabel 4.4 Factoren voor berekening van op te spuiten gewichtshoeveelheden

Factoren zijn gebaseerd op kg/m² per 0,1 mm laagdikte

Materialen	Depositierendement in %			
	40	60	80	100
Aluminium	0,635	0,423	0,308	0,250
Chroomstaal	1,886	1,251	0,943	0,750
Roestvast staal	1,693	1,116	0,847	0,673
Zink	1,886	1,251	0,943	0,750
Molybdeen	2,213	1,482	1,116	0,885
Nikkel	1,886	1,251	0,943	0,750
Cr_2O_3 99,9	1,251	0,827	0,635	0,500
ZrO_2-MgO 75-25	1,347	0,904	0,673	0,539
C-Staal	1,732	1,154	0,866	0,693
WC-Co 88-12	3,078	2,059	1,539	1,231
WC-Co 83-17	2,751	1,828	1,366	1,097

Voorbeeld
Voor het autogeen opspuiten van 2 m² met een laag aluminium van 0,5 mm bij een werkstukrendement van 90% en een depositierendement van 80% kan de hoeveelheid opspuitmateriaal als volgt worden bepaald:

$$K = \frac{\text{Op te spuiten oppervlak in m}^2 \text{ x laagdikte in 0,1 mm x depositierendement}}{\text{werkstukrendement}}$$

$$= \frac{2\ \text{m}^2 \times 5\ (= 0{,}5\ \text{mm}) \times 0{,}308\ \text{kg/m}^2\ (\text{per } 0{,}1\ \text{mm})}{0{,}9} = 3{,}42\ \text{kg}$$

4.2.5.3 *Opbrengst bij het opspuiten en opspuittijd*

De keuze voor een bepaalde techniek wordt onder andere bepaald door:
- de verlangde kwaliteit van de deklaag;
- type van het te verspuiten materiaal;
- de kostprijs van de opgespoten laag;
- de beschikbaarheid van de apparatuur;
- mogelijkheden van nabewerking (zie ook 6.4).

De gebruikte techniek en het type op te spuiten materiaal zijn bepalende factoren voor de opbrengst in kg per uur. De grootste opbrengst wordt verkregen door het elektrisch boogspuiten. Niet alle materialen en zeker de meer complexe kunnen elektrisch worden verspoten. Het autogeen en het plasmaspuiten hebben een lagere opbrengst, maar maken het gebruik van meer complexe legeringen mogelijk.
De keus is daarom ook afhankelijk van het te verspuiten materiaal en daarna kan dát proces worden gekozen dat de hoogste opbrengst heeft. Wanneer een hoge dichtheid wordt verlangd, komen het plasmaspuiten en de hoge snelheidsprocessen in aanmerking.
Om een indruk te geven hoe de opbrengsten van enkele spuitprocessen zich verhouden zijn enkele richtwaarden in tabel 4.5 gegeven.

tabel 4.5 Richtwaarden van enkele spuitprocessen en veel gebruikte opspuitmaterialen

Materiaal	Opbrengst van het spuitproces in kg/h			
	Autogeen		Elektrisch (300 A)*	Plasma (40 kW)
	draad (1/8")	poeder		$N_2 + H_2$
Aluminium	5,5	4,5	8,1	4,6
Chroomstaal	5,9	6,4	14,7	7,7
Aluminiumbrons	6,8	6,4	19,5	8,4
Laag C-Staal	5,9	5,9	4,7	4,5
Roestvast staal	5,9	6,4	15,3	6,6
Zink	14,5		30,0	
Molybdeen			9,0	4,6
Witmetaal	18,2		60,6	
Cr_2O_3-TiO_2 96-2				4,1
ZrO_2-MgO 75-25				5,0
WC-Co 88-12				6,8
Al_2O_3				2,5

* De opbrengst in de tabel is gegeven per 300 A. Voor andere stroomsterkten is de opbrengst evenredig hiermee. Het elektrisch spuiten is mogelijk tot circa 1400 A bij grote continu produktie-installaties

De opspuittijd wordt verkregen door de hoeveelheid op te spuiten materiaal te delen door de opbrengst per uur zoals in tabel 4.5 aangegeven. Daarbij moet rekening worden gehouden met het werkstukrendement, namelijk het percentage van het gebruikte poeder dat effectief op het werkstuk kan worden opgebracht.

4.2.5.4 *Berekening van de kosten*

De onderdelen,die bij de berekening van de spuitkosten in aanmerking moeten worden genomen, zijn:
- kosten van het opspuitmateriaal (M) in *f*/kg;
- opbrengst van het spuitproces in kg/h (O). Voor de totaal benodigde hoeveelheid kg opspuitmateriaal, zie ook tabel 4.4;
- het werkstukrendement (μ);
- kosten van de gebruikte energie (E_e) in *f*/uur;
- kosten van de apparatuur in *f*/uur (E_a);
- kosten van het arbeidsloon in *f*/uur (A);
- benodigde opspuittijd (t in uren);
- totale kosten in gulden (K).

De formule voor de kosten van het opspuiten wordt dan:

$$K = \left[\left(\frac{M \times O}{\mu}\right) + (E_e + E_a + A)\right] t$$

Dit deel van de kosten is een gedeelte van de totale bedrijfskosten. Geen rekening is gehouden met de volgende posten:
- voorbewerkingskosten, voordraaien, ontvetten, afplakken en stralen;
- steltijden en handling van het werkstuk;
- nabewerkingskosten, insmelten of 'sealen' van de opgebrachte laag, slijpen;
- kwaliteitscontrole (maten, hechting, dichtheid enz.).

Hoofdstuk 5

Voorbehandeling

5.1 Reinigen

Voorafgaande aan het gritstralen ter verkrijging van een goed oppervlak waarop de spuitlaag kan worden aangebracht, is het noodzakelijk om het te bewerken onderdeel te reinigen van vet en vuil.
Het uiteindelijke resultaat van het spuiten (hechting, porositeit) hangt in belangrijke mate af van de zorgvuldigheid van het reinigen van het werkstukoppervlak.

Dit reinigen kan handmatig geschieden door middel van het gebruik van ontvettingsmiddelen zoals koolwaterstoffen. De voorkeur gaat echter uit naar het ontvetten en reinigen van het onderdeel middels het gebruik van een reinigingsmachine, bijvoorbeeld een dampontvetter of een spoelmachine waarin verwarmd water met daarin een alkalisch reinigingsmiddel met hoge druk op het werkstuk wordt gespoten. Het voordeel van dit machinaal reinigen ligt vooral in de effectiviteit ervan. Niet alleen bij verontreinigde reparatie-onderdelen, maar ook bij nieuwe delen die veelal zijn vervaardigd met gebruikmaking van een bewerkingsvloeistof, is het van het grootste belang dat aanwezige vet- of olieresten van het basismateriaal worden verwijderd. Met de keuze van het reinigingsmiddel dient men voorzichtig te zijn, vooral bij aluminium- en titaanlegeringen. Bij deze materialen moeten geen chloorhoudende ontvettingsmiddelen worden toegepast. De meeste basismaterialen zijn voldoende resistent tegen de reinigingsmiddelen, maar er zijn er ook een aantal die juist door het reinigingsprodukt kunnen worden aangetast.
In zijn algemeenheid geldt dat, na het toepassen van welke reinigingsmethode dan ook, er geen resten van het reinigingsmiddel meer op het oppervlak aanwezig mogen zijn.

5.2 Gritstralen

Na het reinigingsproces moet het te spuiten onderdeel worden gegritstraald om een voldoend ruw oppervlak te krijgen. Hierdoor wordt de hechtsterkte van de deklaag vergroot.
Het gritstralen gebeurt door een hard korrelvormig materiaal met grote kracht op het oppervlak te blazen of te slingeren. Een veel toegepaste methode is het pneumatisch stralen. Een straalmiddel wordt met behulp van een luchtstroom in een straalpijp versneld en op het oppervlak van het werkstuk geblazen.
Als straalmiddel wordt in het algemeen korund (Al_2O_3) gebruikt. Andere middelen zijn natuurlijk mogelijk. Korund is geschikt voor zowel staal, roestvast staal als non-ferro metalen. Bovendien kan een grote bewerkingssnelheid worden gehaald, terwijl de eventueel in het werkstuk ingeslagen en vastzittende korunddeeltjes in slechts geringe mate nadelige invloeden uitoefenen.
Goede resultaten verkrijgt men als het straalmiddel een mengsel van korrels van 0,5 tot 2 mm bevat. Stof moet uit het mengsel worden verwijderd. De oppervlaktegesteldheid, met een ruwheid van circa 100 µm, verkregen bij een straaldruk van 2,5 - 6 bar is voldoende voor een optimale hechting. De levensduur van het straalmiddel is aanzienlijk groter bij lage druk.
Als de hoek waaronder het straalmiddel het werkstuk treft tussen de 45° en 90° ligt, krijgt men de gewenste opruwing en reiniging. Van belang is ook de afstand van het straalmondstuk tot het werkstuk. De aanbevolen afstand op grond van proeven is 150-300 mm.
Stralen van grote werkstukken vindt plaats in cabines waar het straalmiddel na gebruik door een cycloon en een filterinstallatie gaat, die de kleine deeltjes en vuil afscheidt, waarna het schone straalmiddel weer in de straalketel wordt teruggevoerd.
Voor kleine werkstukken zijn er straalkabinetten. Dit zijn gesloten kasten, voorzien van een raampje, een deur, verlichting en handgaten met rubber dichtingen. Het werkstuk wordt in de kast gelegd en gestraald. Stof wordt ook hier met behulp van een ventilator en filterelementen afgezogen en opgevangen. Het straalmiddel blijft continu in circulatie.
Ook zijn er systemen, waarbij het straalmiddel direct na gebruik via een stofzak in de voorraadketel wordt teruggezogen. Dit zijn de zogenaamde vacuümgritstralers.

Enkele achtergronden van het gritstralen

Gritstralen van een oppervlak heeft tot doel de hechting van de deklaag met het substraat mogelijk te maken respectievelijk te verbeteren. Als algemeen aanvaarde hechtingsmechanismen gelden de volgende:
- mechanische hechting van opgespoten deeltjes die ingesloten worden in open poriën van het substraat, of dat door haakvormig gedeformeerd, uit het oorspronkelijk oppervlak stekend, substraatmateriaal wordt vastgehouden;
- fysische hechting, waarbij atomen van het deklaagmateriaal de atomen van het substraat zo dicht naderen, dat ze binnen elkaars aantrekkingssfeer geraken;
- metallurgische hechting als gevolg van diffusie van deklaagatomen in het substraat of door reactie van deklaagmateriaal met het substraatmateriaal.

Mechanische hechting

Deze vindt plaats bij een gestraald oppervlak. Bij het stralen wordt de kinetische energie van het straalmiddel omgezet in een oppervlaktedeformatie van het substraat. Naarmate de kinetische energie groter is, zal de deformatie toenemen. De kinetische energie bepalende factoren zijn afmetingen, dichtheid en snelheid van het straalmiddeldeeltje.
Naast deze drie factoren speelt de vorm en de hardheid van het straalmiddel en de hoek waaronder het straalmiddel het oppervlak treft een rol. Een scherpkantig, hoekig deeltje zal het substraatoppervlak bij gelijke kinetische energie sterker deformeren dan een bolvormig deeltje.

Fysische hechting

Dit type hechting wordt door de reinigende werking van het gritstralen geactiveerd.

Metallurgische hechting

Voor dit hechtingsmechanisme geldt dit in principe ook. De micro-deformatie van het oppervlak maakt het oppervlak energierijker, waardoor het actiever wordt in zijn neiging om zich met de deklaag te verbinden.
Men kan dus stellen, dat gritstralen de drie mogelijke bindingsmechanismen bevordert. De topografie (= de geometrische oppervlaktegesteldheid) van een oppervlak is naast zijn zuiverheid een zeer belangrijk kenmerk van het oppervlak na het gritstralen.
Voor het bepalen van het oppervlakteprofiel is een aantal genormaliseerde grootheden ingevoerd. Bij het gritstralen is van belang de grootheid R_a welke gelijk is aan de rekenkundig gemiddelde ruwheidshoogte (DIN 4768).

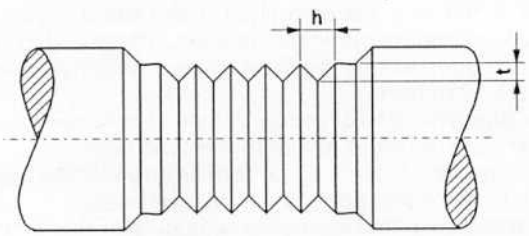
Uit alle onderzoekingen blijkt dat overdadig stralen, dat wil zeggen meer stralen dan nodig is om het oppervlak volledig bedekt te krijgen met inslagmerktekens, een ongunstige invloed heeft op de hechtsterkte. Het uiteindelijke resultaat van de straalbewerking is natuurlijk sterk afhankelijk van de begincondities van het te stralen oppervlak. Het is derhalve weinig zinvol om een vaste receptuur toe te passen. Met de gegeven achtergronden moet het mogelijk zijn, om een goed gefundeerd eigen ervaringspatroon voor het verkrijgen van goed hechtende thermische spuitlagen op te bouwen.

5.3 *Voordraaien*

Voor het voorbereiden van onderdelen als assen en lagers komt het voordraaien het meest in aanmerking. Om dezelfde redenen als bij het gritstralen wordt door het aanbrengen van een profiel in het oppervlak van het werkstuk het hechtingsvlak vergroot.

De bewerking vindt in twee stappen plaats (zie figuur 5.1):
1. Het draaien van de as op een gewenste ondermaat.
2. Het aanbrengen van het profiel met een tophoek van 90° met de formule:

   t = h/2 (t = snedediepte en h = spoed).



figuur 5.1 Voordraaien van een as voor het opspuiten

Voor het schaven en frezen zijn dezelfde randvoorwaarden toe te passen.
Harde oppervlakken die niet met bovengenoemde methoden kunnen worden bewerkt, kunnen droog gegritstraald of geslepen worden.

5.4 *Voorwarmen*

Het is wenselijk het spuitoppervlak of het te spuiten onderdeel voor te verwarmen. Deze voorbehandeling heeft als doel te voorkomen dat aan het oppervlak condens van waterdamp optreedt, waardoor een nieuwe oxydehuid zich kan vormen voor het aanbrengen van de spuitlaag.
Tenslotte kan het wenselijk of noodzakelijk zijn in verband met verschillen in uitzettingscoëfficiënten dat het te spuiten onderdeel een eerste uitzetting reeds heeft ondergaan, voordat deze veroorzaakt wordt door de warmte die tijdens het spuiten wordt toegevoerd.
De mate van voorverwarmen is sterk afhankelijk van onder andere de vorm, de afmeting en de massa van het onderdeel. Als algemene richtlijn is het aan te bevelen het onderdeel zodanig voor te verwarmen, dat het na het stralen een temperatuur heeft van circa 50°C.
Het voorverwarmen is praktisch voor alle onderdelen en alle basismaterialen aan te bevelen.
Uitzonderingen zijn echter die materialen die sterk oxyderen bij lage temperaturen, zoals bijvoorbeeld titaan-, aluminium- en magnesiumlegeringen.

5.5 *Conclusies*

Het reinigen en het voorverwarmen als voorbehandelingen voor het spuiten dienen nauwkeurig te worden uitgevoerd. De hechtsterkte van de spuitlaag is er in hoge mate van afhankelijk. Veel hechtingsproblemen vinden hun oorzaak in een niet juist uitgevoerde voorbehandeling. Het is zinvol om met gritstralen als volgende voorbehandelingsstap pas dan te beginnen, als het reinigen, ontvetten, eventueel maskeren (afdekken van plaatsen waar het werkstuk vrij moet blijven van opspuitmateriaal) en voorverwarmen zo optimaal mogelijk zijn uitgevoerd.
Als maskeermiddelen worden daartoe speciaal ontwikkelde vloeibare stoffen, tapes en mechanische afschermmiddelen gebruikt.

Hoofdstuk 6

Nabehandeling

Om verschillende redenen kan het nodig zijn een thermisch gespoten deklaag na te behandelen. De overweging voor een nabehandeling dient zorgvuldig te zijn, omdat de produktiekosten hierdoor belangrijk zullen worden verhoogd.

De nabehandeling kan tot doel hebben:
- de hechtsterkte van de deklaag op het substraat (het werkstuk) te vergroten en de porositeit te verminderen door middel van insmelten;
- het oppervlak van de deklaag te behandelen met een impregneermiddel (sealer) voor het dichten van poriën;
- door het opbrengen van een verfsysteem op de deklaag deze nog effectiever tegen corrosie te beschermen;
- het gespoten oppervlak op een gewenste maat en oppervlakteruwheid te brengen door middel van draaien of slijpen.

Deze bewerkingen zullen in de volgende paragrafen meer in detail worden behandeld.

6.1 *Insmelten van opspuitpoeders*

De hechtsterkte van een thermisch gespoten laag is afhankelijk van de mate waarin de opgebrachte laag een metallische verbinding heeft aangegaan met het werkstuk. Een belangrijke voorwaarde hiervoor is in ieder geval dat het oppervlak schoon is en een bepaalde ruwheid heeft.
Dit laatste omdat de hechting namelijk voor een deel ook is gebaseerd op een mechanische verankering van de opgespoten deeltjes. Het insmelten geeft een mogelijkheid door middel van diffusie de deklaag inniger met het substraat te verbinden. In hoofdstuk 3 is hierover meer in detail ingegaan.

Er zijn bij voortduring ontwikkelingen gaande de hechting (en ook de dichtheid) van de deklaag te verbeteren. Dit kan plaatsvinden door het spuitdeeltje op zijn gang naar het substraat zoveel meer energie te geven, dat de gewenste diffusie beter tot stand komt, of door in gunstiger atmosferische omstandigheden te werken. Het lagedrukplasma- en het HVOF-spuiten zijn voorbeelden hiervan.

Er zijn wel voorwaarden te stellen aan het substraat en het opgespoten materiaal om te kunnen insmelten. De smeltpunten van beide materialen moeten enkele honderden graden Celsius van elkaar verschillen. Dat betekent dat veelal alleen staalsoorten, inclusief gietijzer, gietstaal en austenitisch roestvast staal, als substraatmateriaal in aanmerking komen.

De opspuitmaterialen die in aanmerking komen, hebben een smelttraject van circa 950-1200°C en zijn legeringen op Ni- of Co-basis met B en Si als smeltpuntverlagende elementen (zie tabel 2.14 in hoofdstuk 2). Deze elementen bevorderen ook de bevochtiging van het metaaloppervlak. De diffusie begint al op een temperatuur van circa 600°C. Het insmelten vindt plaats in het gebied van het smelttraject en moet het bovenste smeltpunt niet overschrijden. In dit gebied is de opgespoten laag nog niet geheel vloeibaar en vertoont bij het insmelten een stroperig karakter. Deze toestand is goed herkenbaar aan het glanzen van het oppervlak. Hierdoor kan het insmelten goed worden beheerst. Het resultaat van insmelten is dat de hechting sterk wordt verbeterd, maar dat ten opzichte van het oplassen toch met relatief dunne lagen van 0,1 tot 2,5 mm kan worden volstaan. Hiermee onderscheidt het zich ten opzichte van het oplassen, waar in het algemeen lagen van minstens enkele mm's moeten worden opgebracht.
De moeilijkheidsgraad van het insmelten moet, zeker bij het handmatig werken, niet worden onderschat. Het vereist vakmanschap onder moeilijke werkomstandigheden.

6.1.1 *Met de vlam*

De meest toegepaste methode van verwarmen voor het insmelten is die met de vlam. Het insmelten gebeurt in twee fasen, namelijk een eerste voor het voorwarmen van het werkstuk en een tweede voor het insmelten zelf. Het insmelten met de vlam is een zaak van ervaring en wordt veelal met behulp van visuele waarneming uitgevoerd. Apparatuur is ontwikkeld waarmee de gewenste temperatuur met behulp van infraroodmeting kan worden geregeld. Gebruik wordt gemaakt van een gas-zuurstof mengsel, waarvan propaan als voorwarmgas en acetyleen als werkgas goed voldoen. De branders zijn in het algemeen aangepast aan de afmetingen van het in te smelten werkstuk. Het zijn kambranders, waarvan er meerdere naast of onder elkaar kunnen worden geplaatst.
De branders moeten met een licht gasoverschot worden ingesteld om een reducerende vlam te krijgen. De juiste temperatuur is bereikt als de deklaag bij het smeltpunt is, waarneembaar als het oppervlak begint te glimmen. Branderinstelling en voortloopsnelheid moeten op dat verschijnsel worden afgeregeld.
Mogelijkheden zijn er om de temperatuur te regelen door middel van een infraroodsensor die de branderinstelling regelt. Ook goed beheersbaar, maar kostbaarder, is het insmelten in een oven.

6.1.2 *In een oven*

Hiervoor lenen zich elektrische ovens waarvan de temperatuur binnen een gebied van ± 5°C kan worden geregeld. Als atmosfeer kunnen gassen als argon en stikstof met een voldoend laag dauwpunt worden toegepast. De maximale temperatuur moet onder het bovenste smeltpunt liggen en het bepalen van de tijd voor het insmelten is een kwestie die proefondervindelijk moet worden vastgesteld. Deze moet echter zo kort mogelijk zijn en zal beperkt zijn tot 5 à 10 minuten.
Een nog betere beheersing van de atmosfeer wordt verkregen door gebruik te maken van een vacuümoven. Vooral bij de toepassing van deklagen waarin een hoog gehalte van bijvoorbeeld wolfraamcarbiden aanwezig is, is de zekerheid dat WC of W_2C-deeltjes door de goede

temperatuursbeheersing niet uiteenvallen van belang.
Vacuümovens met een inhoud van 1,5 m^3 en een laadgewicht tot 1500 kg zijn voorhanden, zodat ondanks de hoge ovenkosten toch economisch produceren mogelijk is.

6.1.3 *Met inductie*

Voor het insmelten van deklagen op assen en in boringen is het insmelten met inductiespoelen een goede werkwijze. In het algemeen is bij een bepaald vermogen de tijd de regelende factor. De temperatuurcyclus moet nauwkeurig proefondervindelijk worden vastgesteld. Dat betekent dat het inductie-insmelten voor enkele stuks niet verantwoord is, maar dat er in grotere series moet worden gewerkt.

6.1.4 *Met een laserbundel*

Met een laserbundel kan zoveel warmte goed gedefinieerd op een specifiek deel van een werkstuk worden overgedragen, dat met grote snelheden oppervlaktelagen kunnen worden ingesmolten. De hoge snelheden kunnen worden bereikt door de korte interactietijd van circa 0,01 tot 0,1 s nodig om het werkstuk op temperatuur te brengen.
Door het toepassen van optische hulpmiddelen kan de cirkelvormige laserbundel met in het algemeen een Gaussische energieverdeling worden omgezet in een rechthoekige vorm met een gelijkmatige energieverdeling. Hierdoor wordt hetzelfde effect verkregen als bij een kambrander.
De toepassing wordt geremd door enkele factoren, namelijk de investeringskosten van de installatie en de regeling. Een laser met een vermogen van minstens 1,5 kW is nodig om lagen goed en snel te kunnen insmelten. De investering, inclusief besturing, komt al gauw op minimaal 500.000 gulden en kan snel tot 1 miljoen gulden oplopen. Door de hoge produktiesnelheden en het fijnzinnig richten van de bundel kunnen unieke resultaten worden bereikt.
Per definitie worden laserbewerkingen op metalen door middel van een CNC-sturing uitgevoerd. De hoge bewerkingssnelheden laten een handmatig besturing dan ook niet toe. Voor het insmelten moet binnen een nauw temperatuursgebied worden gewerkt. Wil men een laser kunnen gebruiken dan zal er een effectieve temperatuurregeling aanwezig moeten zijn. Ontwikkelingen op dat gebied wettigen de veronderstelling dat dergelijke apparatuur binnen niet al te lange tijd standaard kan worden geleverd.

6.2 *Impregneren (sealen) van opgespoten deklagen*

Voordat een mechanische nabewerking wordt toegepast, is het veelal nodig om eerst de porositeit van een gespoten laag af te sluiten (het zogenoemde sealen). Impregneren is een methode om de corrosiebestendigheid van de gespoten laag te vergroten. Hoewel impregneren meestal onder atmosferische condities gebeurt, kan de penetratiediepte aanmerkelijk worden vergroot door het te behandelen voorwerp in een vacuümtank te plaatsen.

De middelen kunnen worden onderverdeeld in een aantal typen:

6.2.1 *Een was op paraffine basis*

Deze laat zich direct na het spuiten het gemakkelijkst aanbrengen op het nog warme spuitoppervlak (circa 90°C). Bij deze temperatuur zal de was smelten en, gedurende de tijd waarin het gespoten produkt verder afkoelt, de gelegenheid hebben om in de poriën te dringen. Overtollig impregneermiddel welke zich na het stollen aan de oppervlakte bevindt, dient voor het naslijpen te worden verwijderd om te voorkomen dat de slijpsteen wordt verzadigd met was. De aanwezigheid van de was zal bij het nadraaien de bewerking gunstig beïnvloeden.
Duidelijk zal zijn dat deze middelen alleen toegepast kunnen worden bij bedrijfstemperaturen beneden circa 70°C.

Voordelen van dit type impregneermiddel zijn:
- op eenvoudige wijze van aanbrengen;
- geschikt voor een breed toepassingsgebied zoals zoet en zout water, de meeste zuren, basen en olieprodukten.

Een nadeel is dat het naderhand bijspuiten van de laag een probleem is.

6.2.2 *Een luchtdrogende phenol-impregneermiddel*

Dit type middel kan eveneens op een eenvoudige wijze worden opgebracht door middel van een kwast. Wanneer het gespoten produkt is afgekoeld tot circa 40°C dienen er minimaal twee lagen impregneermiddel te worden aangebracht met een tussentijd van ongeveer 30 minuten. De uithardingstijd bedraagt naargelang de dikte van de spuitlaag 1 tot 8 uur.

Voordelen van dit impregneermiddel:
- zeer eenvoudig aan te brengen;
- bestand tegen een bedrijfstemperatuur van circa 200°C;
- bestand tegen een breed scala van agressieve media;
- geen dichtsmering van de slijpsteen tijdens het nabewerken.

Nadelen zijn dat de middelen zeer brandbaar en slecht voor mens en milieu zijn.

6.2.3 *Een anaërobe impregneermiddel*

Dit produkt kenmerkt zich door een aantal belangrijke eigenschappen. Door de grote capillaire werking en de lage viscositeit kan het tot in de kleinste poriën doordringen. Bovendien vindt uitharding pas plaats nadat er sprake is van een metallisch contact in combinatie met een zuurstofvrije omgeving. Dat betekent dat het uithardingsproces begint als de poriën volledig zijn opgevuld met het middel.
Door deze eigenschappen, in combinatie met een hoge mate van chemische resistentie, is dit produkt superieur aan bovengenoemde impregneermiddelen. De wijze van aanbrengen gebeurt door middel van kwast of spuitflacon. De uithardingstijd is afhankelijk van de grootte van de poriën en het spuitmateriaal waarop het wordt toegepast.

6.3 *Het aanbrengen van verfsystemen*

Door het aanbrengen van een verfsysteem op een Al- of Zn-deklaag kan de levensduur van de laag aanzienlijk worden verlengd. In aanmerking komen onder andere epoxy- en phenolharscombinaties. Voor informatie hierover kan men zich het beste wenden tot een verfleverancier.
Een niet geheel voor de hand liggende mogelijkheid is het nabehandelen van een met aluminium gespoten stalen werkstuk door middel van een diffusiegloeiing. Het aluminium diffundeert dan in het ijzer en vormt dan een hoogtemperatuurbestendige Al-Fe verbinding die het staal tegen aantasting beschermt. Wordt deze bewerking op het onbeschermde aluminium uitgevoerd, dan zal dit zo snel oxyderen dat er nauwelijks nog materiaal voor diffusie aanwezig is. Een verflaag zal kunnen voorkomen dat dit in eerste fase plaatsvindt

6.4 *Het machinaal nabewerken van opgespoten lagen*

6.4.1 *Draaien van opgespoten lagen*

Gezien de laagopbouw van een koudgespoten materiaal, de hoge krimpspanning, lage treksterkte, oxyde- en carbidebestanddelen en porositeit, vraagt het draaien van een gespoten laag speciale aandacht. Een gespoten laag is door deze eigenschappen bij het verspanen niet te vergelijken met gegoten of gewalst materiaal.
Voor het verspanen zal men gereedschap moeten gebruiken, dat ook de kleine harde deeltjes kan verspanen en de hoge wrijvingstemperatuur kan weerstaan. Het gebruik van hardmetaal, al dan niet voorzien van een harde deklaag zoals bijvoorbeeld titaancarbide, keramische beitelplaatjes, kubisch boriumnitride en diamant zal vaak tot het best haalbare resultaat leiden. In veel gevallen zal men echter een betere oppervlaktegesteldheid verkrijgen indien men overgaat op slijpen.

- *Beitelkeuze*
  Voor het bewerken van kortspanige materialen komen het meest in aanmerking de hardmetaalbeitels of -plaatjes van het type k 01 en k 05.
  Ook kubisch boriumnitride is zeer geschikt vanwege zijn grote hardheid en hoge temperatuurbestendigheid.

- *Beitelhoeken*
  Een vrijloophoek van 7° en een snijhoek van 12° zal in het algemeen voldoen. Negatieve snijhoeken moeten worden vermeden. Om een te snelle slijtage van de beitelpunt te voorkomen wordt een radius van R = 0,75 mm en groter aanbevolen.

- *Snijsnelheid*
  De snijsnelheid voor de niet ijzerhoudende spuitlagen ligt rond de 80 m/min. Voor hardere spuitlagen verkrijgt men het beste resultaat als men een snijsnelheid van 7 - 30 m/min. toepast bij het gebruik van hardmetaal. Bij de toepassing van boriumnitride kan men de snijsnelheid met een factor 5 verhogen tot 60-150 m/min.

- *De aanzet*
  Voor aluminium en witmaal kan de aanzet 0,1 à 0,2 mm/omw. bedragen. Voor de meeste andere metalen liggen deze waarden onder de 0,1 mm. In het algemeen dient de aanzet kleiner te zijn dan de in de deklaag aanwezige deeltjes. Dat geldt dan met name voor carbidenhoudende deklagen. Het gevaar van uitbreken van de deeltjes is anders groot.
  Slijpen geeft in die gevallen meer betrouwbare resultaten.

6.4.2 *Slijpen van opgespoten lagen*

In het algemeen verdient het slijpen als nabewerkingsmethode de voorkeur, omdat de meeste spuitlagen tamelijk bros zijn en bovendien vaak zeer harde deeltjes bevatten. Gebruikelijk is om slijpstenen van siliciumcarbide te gebruiken. Deze zijn in enkele varianten verkrijgbaar, zoals het siliciumcarbide groen en zwart. De keuze wordt bepaald door het te slijpen materiaal. Voor informatie hierover kan het beste een leverancier van slijpmaterialen worden geraadpleegd.
Te overwegen valt, voor het slijpen van harde lagen, diamantschijven te gebruiken. Ze zijn duurder, maar de bewerkingssnelheid is groter. Bij zeer harde lagen is het gebruik van diamantschijven noodzakelijk. In de hieronder volgende toelichting wordt uitgegaan van het gebruik van siliciumcarbide slijpmaterialen.
Voor het verkrijgen van zowel gladde lagen als een voldoende afname, wordt veelal een combinatie van een voorslijp- en een finishsteen gebruikt.
Spuitlagen met een hardheid boven HR_C 30 moeten bij voorkeur worden geslepen met een korund of Ek slijpsteen ter verkrijging van een strakke en gladde finish. De gewenste ruwheid van het produkt bepaalt de keuze van de korrelgrootte van de slijpsteen.
Voor het typeren van de slijpsteensoort is een samenstel van letters en cijfers bedacht. Deze zijn voor een neutrale mogelijkheid van aanduiding omschreven in DIN 69100. De slijpsteenfabrikanten geven hun produkten ook met een soms daarop lijkende codering aan, maar daar wordt ook van afgeweken.
In tabel 6.1 is een overzicht gegeven van de te gebruiken slijpschijven voor het bewerken van een aantal thermisch gespoten deklagen. De daarin gebruikte coderingen zijn in tabel 6.2 verklaard en ontleend aan DIN 69100.

Voor het natslijpen van spuitlagen met een hardheid van circa HR_C 60 kan gebruik worden gemaakt van bijvoorbeeld een slijpsteen type C60-J11-VR. Deze type-aanduiding beschrijft een siliciumcarbide steen met een korrelgrootte van 60 mesh, een middelzachte binding type J met een gemiddelde open structuur cijfer 11. Het bindmiddel in dit geval is keramisch/rubber type VR. In het algemeen dus een vrij grove steen met een open en zachte binding. Een hogere korrelaanduiding betekent een fijnere korrel en geeft een gladdere finish maar heeft doorgaans een lagere verspaningssnelheid. De slijpsteenkeuze wordt in niet geringe mate mede bepaald door de stabiliteit van de slijpbank, de geometrie van het te slijpen voorwerp en de slijpsteenbreedte.
De keuze van de te gebruiken slijpsteen, de slijpsnelheid, voeding, aanzet en het eventueel te gebruiken koelmiddel, is van belang voor de

tabel 6.1 Aanwijzingen voor het gebruik van slijpstenen

Materiaal	Steensoort	Slijpmethode
Insmeltlegeringen op basis van Ni-Cr-B-Sii en/of Co-C-rB-S	C60-J11-VR C46-H11-VR	rond vlak
Insmeltlegeringen op basis van Ni-Cr-B-Si met wolfraamcarbide	C80—F11-VR C80-F11-VR	rond vlak
Corrosie- en hittebestendige materialen op basis van Ni-Cr	C60-J11-VR C46-H11-VR	rond vlak
Nikkel, koolstofstaal	C60-J4-VE C60-J11-VR	rond vlak
Wolfraam, tantaal	C100-G11-VR C100-G11-VR	rond vlak rond/vlak
Molybdeen	C60—J4-VE C60-J11-VR	rond vlak
Chroomcarbide	C80-F11-VR C80-F11-VR	rond vlak
Wolfraamcarbide	C80-F11-VR C80-F11-VR	rond vlak
Chroomoxyde	C100-G11-VR C100-G11-VR	rond vlak
Alumniumoxyde	C100-G11-VR C100-G11-VR	rond vlak
Zirkoonoxide	C100-G11-VR C100-G11-VR	rond vlak
Nikkel-aluminium	C60—J4-VE C60-J11-VR	rond vlak
Draadgespoten koper en -legeringen, Nikkel en -legeringen, molybdeen	C60—J4-VE C60-J11-VR	rond vlak
Cr-Ni-Fe legeringen, roestvast staal, koolstofstaal	C46-K4-VE C60-J11-VR	rond vlak

uiteindelijke kwaliteit van de gespoten laag. Het gebruik van een te harde steen, die een te hoge slijpdruk veroorzaakt, zal het bovenste gedeelte van de spuitlaag enigszins deformeren. Door een hoge slijpdruk ontstaat er veel wrijvingswarmte, waardoor aan het oppervlak scheurtjes kunnen ontstaan. Het is van belang dat de koelinstallatie van de machine een voldoende capaciteit heeft, zodat er een ruime straal koelmiddel op het slijpvlak kan worden toegevoerd. Omdat de meeste gespoten materialen de neiging hebben om de slijpsteen dicht te smeren, moet worden gekozen voor een relatief grove korrel, een hoge porositeit en een zachte korrelbinding. Hierdoor kan de steen voldoende verspaand materiaal opnemen en is tevens een goede koeling mogelijk. Ook kan het oppervlak van de steen worden hersteld door hiervan vaker een laagje af te nemen (het dressen).
Veelal zal de praktijk moeten uitmaken welke waarden voor een specifiek slijpwerk de beste resultaten geven. Na het slijpen kan het wenselijk zijn om, ter verkrijging van een lagere oppervlakteruwheid, een extra mechanische bewerking uit te voeren. Honen, superfijnen en lappen zijn bijvoorbeeld zulke bewerkingen.
Het is wenselijk om zo mogelijk vooraf door middel van een proefstuk de meest geschikte parameters vast te stellen. Een goed gespoten laag kan door een verkeerde nabewerking onbruikbaar worden.

6.4.3 *Honen, superfijnen en leppen*

- *Honen*
  Honen is een verspanende fijnbewerking met in slijplichamen gebonden korrels als gereedschap waarbij het gereedschap voortdurend in contact blijft met het werkstuk. De essentie van het honen is het afvlakken van de pieken in het oppervlak; daarnaast worden golfpatronen in het oppervlak als gevolg van het slijpen of draaien teniet gedaan. Met behulp van honen kan een lage ruwheid en een hoog percentage dragend oppervlak worden behaald (afgetopte pieken zijn belangrijk bij afdichtingen).

- *Superfijnen*
  Bij het superfijnen ofwel het korteslaghonen draait het werkstuk rond terwijl het slijplichaam zeer snel (meestal pneumatisch) in axiale richting heen en weer bewogen wordt.

tabel 6.2 Verklaring van de codering voor slijpschijven volgens DIN 69100

type steen en korrelgrootte	-	hardheid en structuur	-	bindmiddel

type steen:	Voor opgespoten lagen wordt siliciumcarbide gebruikt		C
korrelgrootte:	Deze is ingedeeld in groepen,	30- 60 (mesh) 70-180	middel fijn
hardheid:	Hiervoor is een lettercodering te gebruiken,	F en G J en H	zeer zacht zacht
structuur:	De dichtheid van de slijpkorrels	1 tot 4 5 tot 7 8 tot 11	dicht normaal open
bindmiddel:	Het middel waarmee de korrels zijn gebonden, een combinatie is mogelijk	V R	keramiek rubber

- *Leppen*
  Leppen is een fijnbewerkingspoces waarbij twee vlakken tegen elkaar aan wrijven met een medium daartussen. Afhankelijk van de hardheid en de porositeit van het gereedschapsvlak worden de lep-korreltjes meer of minder afgerold en voert zo een knedende beweging op het werkstuk uit. Indien de korreltjes in het gereedschapsvlak blijven steken, voert het net zoals bij het honen een fijnverspaningsbewerking uit. Het hele lepproces is dus een combinatie van kneed-, rol- en snijbewerkingen. Zo zullen oppervlakken die voornamelijk door rollende bewerkingen zijn gelept er mat uitzien en die door snijdende bewerkingen glanzend. Als lep-medium wordt vaak siliciumcarbide-, aluminiumoxyde- of diamantkorrels in een lep-olie of lep-vloeistof (op waterbasis) gebruikt.

Bovenstaande processen kunnen worden gebruikt na het slijpen van thermische gespoten lagen, indien de oppervlakte aan zeer nauwkeurige eisen moet voldoen voor wat betreft maatvoering of ruwheid.

Hoofdstuk 7

Praktijkvoorbeelden

7.1 *Inleiding*

Door de veelheid van materialen en processen voor het thermisch spuiten en de gebruiksomstandigheden is de keuze hiervan niet eenvoudig.
Technische en economische overwegingen voor die keuze zijn in hoofdstuk 4 behandeld.
Teneinde de keuze wat aanschouwelijker te maken, is een overzicht van een aantal voorbeelden samengesteld.
Hierin zijn de meest interessante spuitprocessen verwerkt. Dit zijn:
- het autogeen poeder- en draadspuiten;
- het elektrisch spuiten;
- het plasmaspuiten;
- het HVOF-spuiten.

De hoeveelheid voorbeelden van elk van de groepen is een grove afspiegeling van de omvang van de toepassing in ons land.
Zoveel mogelijk zijn produkten weergegeven die ook door de Nederlandse industrie worden behandeld.
Van een aantal voorbeelden waren niet alle gegevens bekend.

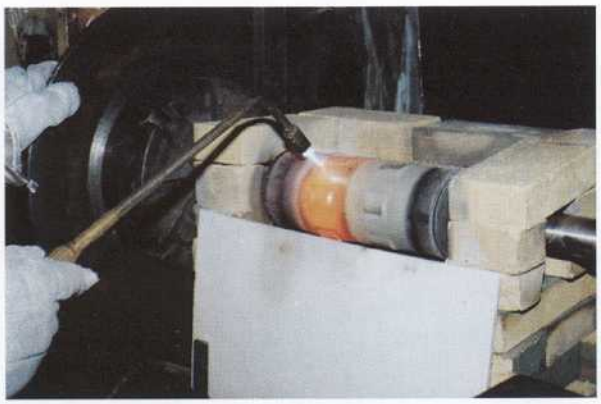
7.2 *Indeling van de gegevens*

In de overzichten is een aantal kenmerken genoemd die verband houden met de uitvoering van het thermisch spuiten van een produkt.
Deze zijn zo volledig mogelijk ingevuld.

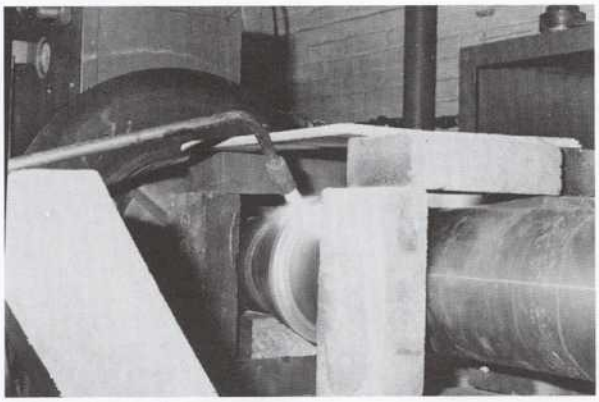
▪Produkt	Een aanduiding van het produkt met afbeelding;
▪Toepassing	Voor welk tak van de industrie het produkt dient;
▪Deklaagfunctie	Bedoeld voor slijtage, corrosie enz.;
▪Basismateriaal	Soms alleen een globale typering;
▪Opspuitproces	Eén van de bovengenoemde processen;
▪Voorbehandeling	Mechanische behandeling, ontvetten en eventueel maskeren;
▪Voorwarmtemperatuur	De minimale temperatuur bij aanvang van het spuiten;
▪Bedrijfstemperatuur	De temperatuur van het produkt in de praktijk;
▪Tussenlaag	Een eventueel aangebrachte tussenlaag;
▪Opspuitmateriaal	Verwezen kan worden naar de typeringen in de tabellen van hoofdstuk 2;
- poeder, type;	
- draad, type;	
▪Laagdikte	Van de toplaag;
▪Insmelten	Gebruikte methode;
▪Nabehandeling	Eventueel een (mechanische) nabehandeling, volgens hoofdstuk 6;
▪Bijzonderheden	Eventuele achtergrondinformatie over de redenen voor het opspuiten of de procedure.

7.3 *Autogeen poederspuiten*

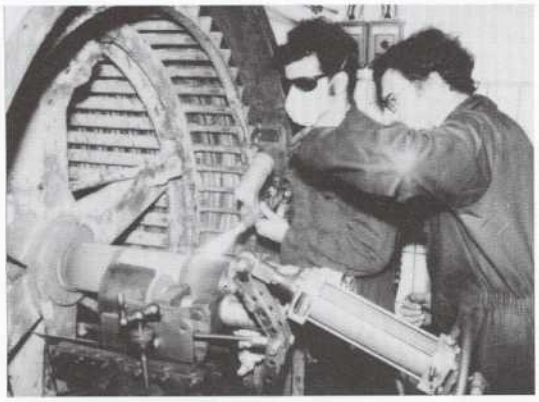
Produkt:	Mengblad van roerwerk (figuur 7.1)
Toepassing:	Kunststofindustrie
Deklaagfunctie:	Slijtage
Basismateriaal:	Roestvast staal AISI 304
Opspuitproces:	Autogeen-poeder
Voorbehandeling:	Stralen, ontvetten
Voorwarmtemperatuur:	50°C
Bedrijfstemperatuur:	300 à 400°C
Tussenlaag:	Geen
Opspuitmateriaal: poeder, type	WC-NiCr 50-50
Laagdikte:	1 mm
Insmelten:	Autogeen, autogeen/zuurstof
Nabehandeling:	Geen



Produkt:	Boorcentrering (figuur 7.2)
Toepassing:	Grondboringen
Deklaagfunctie:	Slijtage
Basismateriaal:	Laaggelegeerd staal
Opspuitproces:	Autogeen-poeder
Voorbehandeling:	Stralen, ontvetten
Voorwarmtemperatuur:	50°C
Bedrijfstemperatuur:	300 à 400°C
Tussenlaag:	Geen
Opspuitmateriaal: poeder, type	Ni-CrBSi 65-16
Laagdikte:	3 mm
Insmelten:	Autogeen, acetyleen/zuurstof
Nabehandeling:	Slijpen
Bijzonderheden:	Nokken op een 'spacer' voor boorcentrering

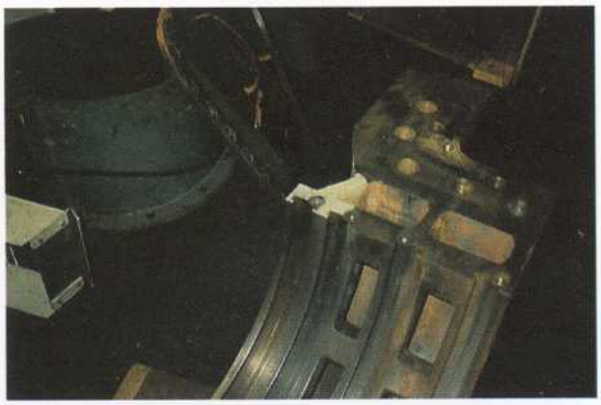


Produkt:	Astap (figuur 7.3)
Toepassing:	Kolenwinning
Deklaagfunctie:	Slijtage
Basismateriaal:	Laaggelegeerd staal
Opspuitproces:	Autogeen-poeder
Voorbehandeling:	Voordraaien, stralen en ontvetten
Voorwarmtemperatuur:	50°C
Bedrijfstemperatuur:	300 - 400°C
Tussenlaag:	Geen
Opspuitmateriaal: poeder, type	Ni-CrBSi
Laagdikte:	1,5 mm
Insmelten:	Autogeen, acetyleen/zuurstof, circa 1.000°C
Nabehandeling:	Slijpen
Bijzonderheden:	Astap Ø 140 mm van kolengravers



Produkt:	Sterilisator (figuur 7.4)
Toepassing:	Zuivelindustrie
Deklaagfunctie:	Slijtage
Basismateriaal:	Roestvast staal
Opspuitproces:	Autogeen-poeder
Voorbehandeling:	Voorslijpen, stralen en ontvetten
Voorwarmtemperatuur:	50°C
Bedrijfstemperatuur:	50 - 80°C
Tussenlaag:	Geen
Opspuitmateriaal: poeder, type	FeNiCr Mn 19-9,5 (AISI 304)
Laagdikte:	Circa 2 mm
Insmelten:	Neen
Nabehandeling:	Slijpen

Bijzonderheden: Continu sterilisator van een melkfabriek waarvan de afdichting op de as is versleten. Lengte-as is circa 8.000 mm. Opspuiten en slijpen op locatie uitgevoerd in 15 % van de normale reparatietijd indien onderdeel in zijn geheel was vervangen

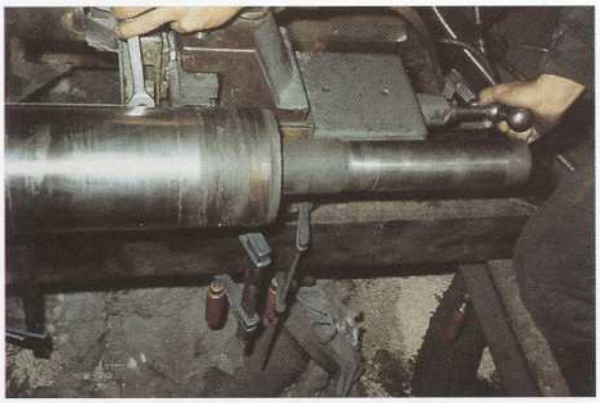


Produkt:	Stoomturbine (figuur 7.5)
Toepassing:	Elektrische centrale
Deklaagfunctie:	Reparatie
Basismateriaal:	Gietijzer
Opspuitproces:	Autogeen-poeder
Voorbehandeling:	Stralen
Voorwarmtemperatuur:	50°C
Tussenlaag:	Geen
Opspuitmateriaal: poeder, type	Ni-AlMo 90-5,5
Laagdikte:	Circa 3 mm
Insmelten:	Neen
Nabehandeling:	Slijpen

Bijzonderheden: Lagedrukgedeelte van een stoomturbine. Op het scheidingsvlak van de onder- en bovenkap zijn circa 30 lekkages ontstaan. Delen zijn ter plaatse gerepareerd.

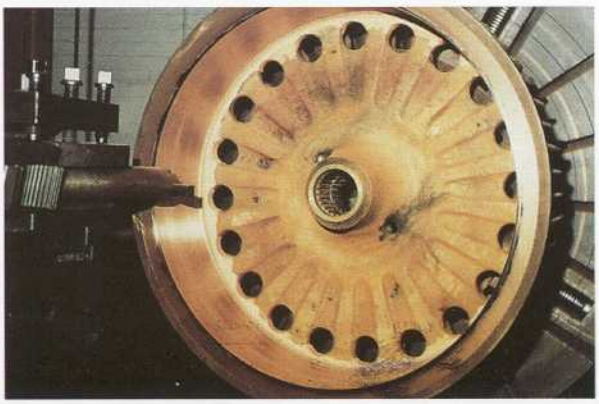
Produkt:	Tegendrukcilinder (figuur 7.6)
Toepassing:	Grafische industrie
Deklaagfunctie:	Reparatie
Basismateriaal:	Gietijzer
Opspuitproces:	Autogeen-poeder
Voorbehandeling:	Stralen, ontvetten
Voorwarmtemperatuur:	50°C
Bedrijfstemperatuur:	max. 80°C
Tussenlaag:	Geen
Opspuitmateriaal: poeder, type	Ni-CrAlMoFe 73-9
Laagdikte:	Opvullen van beschadiging
Insmelten:	Neen
Nabehandeling:	Slijpen

Bijzonderheden: De cilinder is een onderdeel van een drukmachine voor kunststofverpakkingen. Een rondlopende beschadiging was ontstaan door achterblijven van een schroevendraaier. De cilinder, met een diameter van circa 2.000 mm, werd ter plaatse gespoten en geslepen.



Produkt:	Schroefkneder (figuur 7.7)
Toepassing:	Petrochemische industrie
Deklaagfunctie:	Slijtage
Basismateriaal:	Laag C-staal
Opspuitproces:	Autogeen-poeder
Voorbehandeling:	Voorslijpen, stralen en ontvetten
Voorwarmtemperatuur:	50°C
Bedrijfstemperatuur:	max. 80°C
Opspuitmateriaal: poeder, type	Ni-AlMo 90-5,5
Laagdikte:	1,5 mm
Insmelten:	Neen
Nabehandeling:	Slijpen

Bijzonderheden: Afdichtingsvlakken van aandrijfassen van een schroefkneder. De assen met een lengte van circa 5.000 mm behoefden niet te worden gedemonteerd.



Produkt:	Wervelstroomrem van hijskraan (figuur 7.8)
Toepassing:	Hijswerktuigen
Deklaagfunctie:	Slijtage
Basismateriaal:	Gietstaal
Opspuitproces:	Autogeen-poeder
Voorbehandeling:	Voordraaien, stralen en ontvetten
Voorwarmtemperatuur:	50°C
Bedrijfstemperatuur:	max. 80°C
Opspuitmateriaal: poeder, type	Cu 99
Laagdikte:	< 1,5 mm
Insmelten:	Neen
Nabehandeling:	Nadraaien

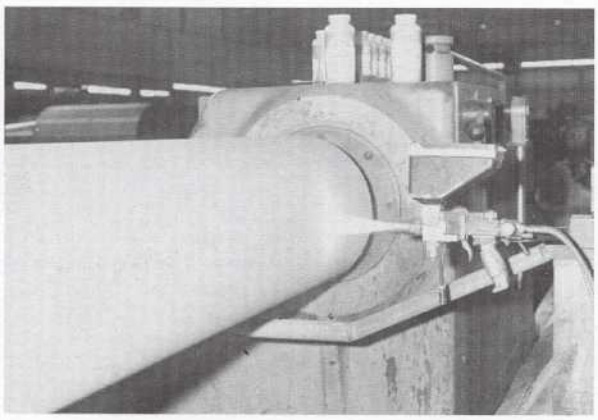
Bijzonderheden: Inwendig gespoten trommel van een wervelstroomrem. De laag heeft na afdraaien een dikte van 1,5 mm. Afmetingen van de trommel zijn Ø 750 x 280 mm.

Produkt:	Fundatieplaat (figuur 7.9)
Toepassing:	Scheepsmotoren
Deklaagfunctie:	Reparatie
Basismateriaal:	Gietijzer
Opspuitproces:	Autogeen-poeder
Voorbehandeling:	Voorkotteren, handruwen, ontvetten
Voorwarmtemperatuur:	50°C
Bedrijfstemperatuur:	Tot circa 80°C
Tussenlaag:	Geen
Opspuitmateriaal: poeder, type	Ni-CrAlMoFe 73-9
Laagdikte:	1 mm
Insmelten:	Neen
Nabehandeling:	Nakotteren

Bijzonderheden: Van de scheepsmotor brak een drijfstang van één der cilinders en sloeg een stuk uit het motorblok. Nadat het blok was gerepareerd door midel van een kramsysteem bleek dat de lagerstoel niet in lijn stond. Nadat de stoel was uitgekotterd, gespoten en nabewerkt, kon deze worden voorzien van een nieuwe lagerschaal.

Produkt:	Thermokoppels (figuur 7.10)
Toepassing:	Petrochemische industrie
Deklaagfunctie:	Bevestiging koppels aan ketelpijpen
Basismateriaal:	AISI 316
Opspuitproces:	Autogeen-poeder
Voorbehandeling:	Stralen en ontvetten
Voorwarmtemperatuur:	50°C
Tussenlaag:	Geen
Opspuitmateriaal: poeder, type	Ni-Cr 80-20
Laagdikte:	Max. 1,5 mm
Insmelten:	Neen
Nabehandeling:	Geen

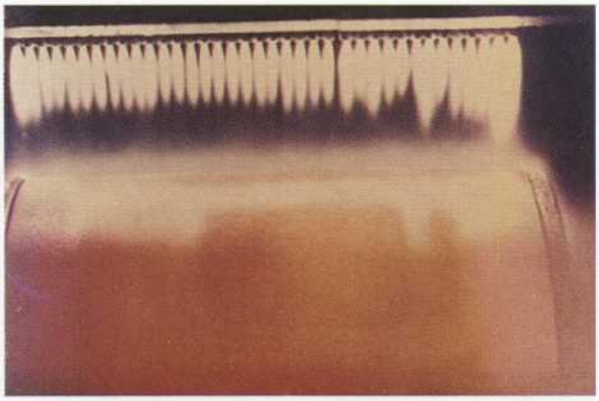
Bijzonderheden: Thermokoppels moesten worden bevestigd in de branderruimte van de raffinageketel. De plaatsen waar de thermokoppels op de buizen werden gehecht, kregen een afdekking door middel van thermisch spuiten



Produkt:	Omzetplunjer (figuur 7.11)
Toepassing:	Staalbereiding
Deklaagfunctie:	Slijtage
Basismateriaal:	C-staal
Opspuitproces:	Autogeen-poeder
Voorbehandeling:	Voorslijpen, ontvetten, stralen, maskeren
Voorwarmtemperatuur:	80°C
Bedrijfstemperatuur:	60°C
Tussenlaag:	Ni-AlMo 90-5,5
Opspuitmateriaal: poeder, type	Ni-CrSiB 86-9,5
Laagdikte:	2,5 mm
Insmelten:	Neen
Nabehandeling:	Slijpen

Bijzonderheden: Opgespoten laag was alternatief voor hardverchromen

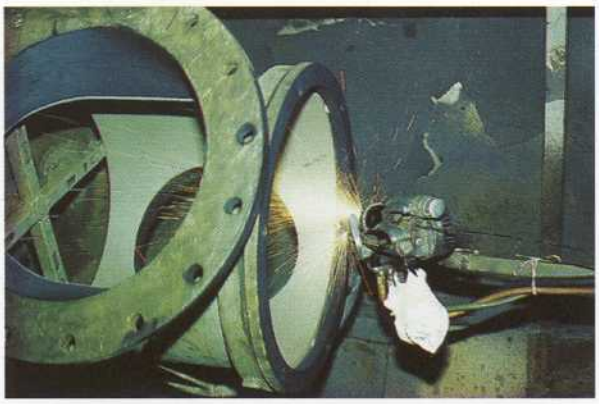
Produkt:	Roerwerk (figuur 7.12)
Toepassing:	Chemische industrie
Deklaagfunctie:	Slijtage
Basismateriaal:	Laag C-staal
Opspuitproces:	Autogeen-poeder
Voorbehandeling:	Stralen
Tussenlaag:	Geen
Opspuitmateriaal: poeder, type	Ni-CrFeSiB 70-17
Laagdikte:	1,5 mm
Insmelten:	Autogeen gasbrander
Nabehandeling:	Geen



Produkt:	Geleiderollen (figuur 7.13)
Toepassing:	Procesindustrie
Deklaagfunctie:	Slijtage
Basismateriaal:	Normaal staal, buis
Opspuitproces:	Autogeen-poeder
Voorbehandeling:	Eerst spanningsarm gloeien bij 700°C, draaien en stralen
Voorwarmtemperatuur:	400 - 500°C
Tussenlaag:	Geen
Opspuitmateriaal: poeder, type	Ni-CrFeSiB 70-170
Laagdikte:	1,5 mm
Insmelten:	Met speciaal ontwikkelde kambranders. Tijd circa 1 uur
Nabehandeling:	Geen

Bijzonderheden: De laag werd opgespoten op stalen buizen met een diameter van 300 mm en een lengte van 2.000 mm. Spuittijd circa 2,5 uur. Poederverbruik circa 25 kg

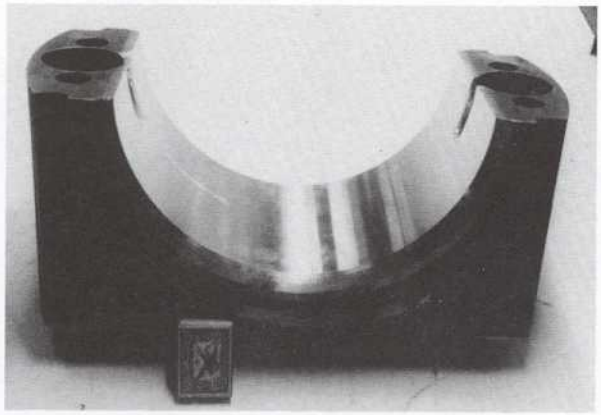
7.4 *Autogeen draadspuiten*



Produkt:	Huis van doseersluis (figuur 7.14)
Toepassing:	Procesindustrie
Deklaagfunctie:	Slijtage
Basismateriaal:	Gietijzer
Opspuitproces:	Autogeen-draad
Voorbehandeling:	Voordraaien, ontvetten, stralen
Voorwarmtemperatuur:	50°C
Tussenlaag:	Ni-Al 20
Opspuitmateriaal:	
- draad, diameter:	3,2 mm
- type	Fe-CrNiMn 19-9,5 (AISI 304) of Fe-Cr 13 (AISI 410)
Laagdikte:	1-3 mm
Insmelten:	Neen
Nabehandeling:	Nadraaien

Bijzonderheden: Doseersluizen worden in allerlei afmetingen gebruikt in de meel- en kunststofindustrie

Produkt:	Koelbus (figuur 7.15)
Toepassing:	Kunststofindustrie, extrusie van PVC-buizen
Deklaagfunctie:	Slijtage
Basismateriaal:	Laag C-staal
Opspuitproces:	Autogeen-draad
Voorwarmtemperatuur:	60°C
Tussenlaag:	Ni-AlFeCr 20-20
Opspuitmateriaal:	
- draad, diameter:	3,2 mm
- type	Fe-Cr 13 (AISI 410)
Laagdikte:	0,8 mm
Insmelten:	Neen
Nabehandeling:	Slijpen



Produkt:	Lagerschalen (figuur 7.16)
Toepassing:	Scheepsmotoren
Deklaagfunctie:	Lagering krukassen
Basismateriaal:	Gietijzer
Opspuitproces:	Autogeen-draad
Voorbehandeling:	Ontvetten, voordraaien, ontvetten, stralen en maskeren
Voorwarmtemperatuur:	60°C
Bedrijfstemperatuur:	80°C
Tussenlaag:	Geen
Opspuitmateriaal:	
- draad, diameter:	3,2 mm
- type	Sn-SbCu 7,5-3,5 (witmetaal)
Laagdikte:	3 mm
Insmelten:	Neen
Nabehandeling:	Draaien

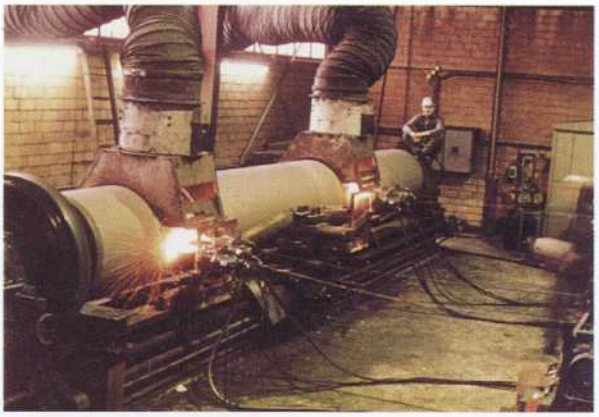
Produkt:	Transportrollen (figuur 7.17)
Toepassing:	Papierindustrie
Deklaagfunctie:	Slijtage
Basismateriaal:	Laag C-staal
Opspuitproces:	Autogeen-draad
Voorbehandeling:	Ontvetten, voordraaien, ontvetten en maskeren
Voorwarmtemperatuur:	80°C
Bedrijfstemperatuur:	60°C
Tussenlaag:	Ni-AlFeCr 20-20
Opspuitmateriaal:	
- draad, diameter:	3,2 mm
- type	Fe-Cr 13 (AISI 410)
Laagdikte:	3 mm
Insmelten:	Neen
Nabehandeling:	Slijpen

Produkt:	Voorraadtank (figuur 7.18)
Toepassing:	Opslag
Deklaagfunctie:	Corrosiebescherming
Basismateriaal:	Laag C-staal
Opspuitproces:	Autogeen-draad
Voorbehandeling:	Ontvetten, stralen
Voorwarmtemperatuur:	30°C
Bedrijfstemperatuur:	Omgevingstemperatuur
Tussenlaag:	Geen
Opspuitmateriaal:	
- draad, diameter:	3,2 mm
- type	Zn-Al 15
Laagdikte:	0,15 mm
Insmelten:	Neen
Nabehandeling	Verfspuiten

Produkt:	Propaangasflessen (figuur 7.19)
Toepassing:	Gasopslag
Deklaagfunctie:	Corrosie
Basismateriaal:	Laag C-staal
Opspuitproces:	Autogeen-draad
Voorbehandeling:	Staalstralen
Opspuitmateriaal: draad, type	Zn 99,9
Laagdikte:	0,1 mm
Nabehandeling:	Verfsysteem

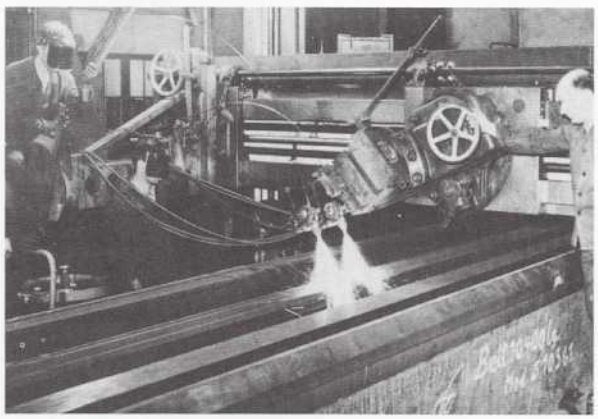
Bijzonderheden: De flessen werden met behulp van een roterende manipulator opgespoten

Produkt:	Olietank (figuur 7.20)
Toepassing:	Opslagtanks
Deklaagfunctie:	Corrosie
Basismateriaal:	Laag C-staal
Opspuitproces:	Autogeen-draad
Voorbehandeling:	Zandstralen
Opspuitmateriaal: draad, type	Zn 99,9
Laagdikte:	0,15 mm
Nabehandeling:	Met sealer

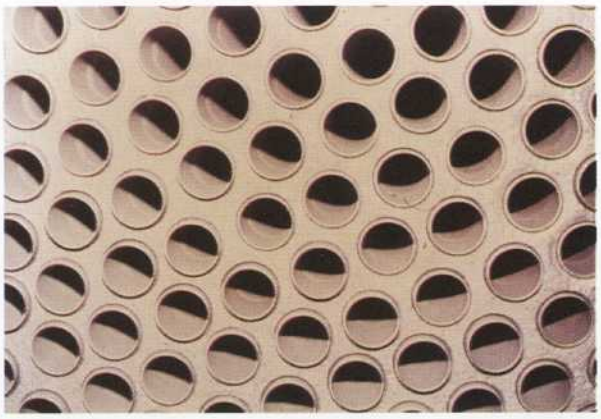


Produkt:	Kalanderwals (figuur 7.21)
Toepassing:	Papierindustrie
Deklaagfunctie:	Slijtage en corrosie
Basismateriaal:	Staal
Opspuitproces:	Autogeen-draad
Voorbehandeling:	Voordraaien en staalstralen
Tussenlaag:	Ni-Al 20
Opspuitmateriaal: draad, type	Fe-Cr 13 (AISI 410) en Fe-CrNiMo 19-11,5 (AISI 316)
Laagdikte:	Respectievelijk 2 en 2 mm
Insmelten:	Neen
Nabehandeling:	Slijpen

Bijzonderheden: Draadverbruik op de afgebeelde wals is circa 800 kg



Produkt:	Draaibankbed met een lengte van 10,4 m (figuur 7.22)
Toepassing:	Reparatie
Deklaagfunctie:	Slijtage
Opspuitproces:	Autogeen-draad
Voorbehandeling:	Schaven
Voorwarmtemperatuur:	50°C
Tussenlaag:	Ni-Al 20, dikte 0,1 mm
Opspuitmateriaal: draad, type	Mn-staal
Laagdikte:	2 tot 3 mm
Nabehandeling:	Schaven en schrapen



Produkt:	Warmtewisselaar (figuur 7.23)
Toepassing:	Apparatenbouw
Deklaagfunctie:	Corrosie van pijpenplaat
Basismateriaal:	Laag C-staal
Opspuitproces:	Autogeen-draad
Voorbehandeling:	Afstoppen van pijpeinden en stralen
Tussenlaag:	Ni-Al 20
Opspuitmateriaal: draad, type	Fe-CrNiMn 19-9,5 (AISI 304) of Fe-CrNiMo 19-11,5 (AISI 316)
Laagdikte:	Circa 1 mm
Nabehandeling:	Met sealer

Bijzonderheden: In het algemeen worden de pijpen meestal uitgevoerd in koper of roestvast staal, maar de pijpenplaten in normaal staal. Vooral toepassing in de suikerindustrie

7.5 *Elektrisch spuiten*

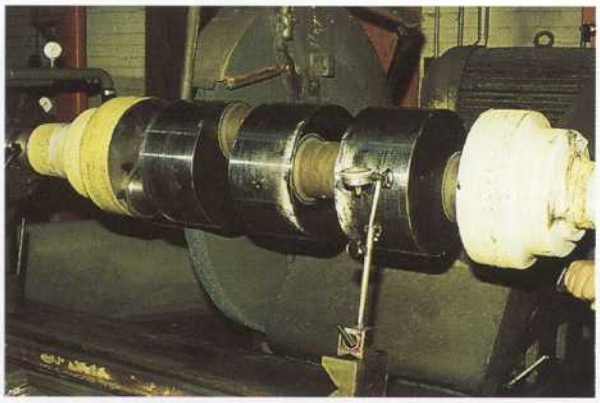
Produkt:	Nestenschijven (figuur 7.24)
Toepassing:	Hijskranen
Deklaagfunctie:	Vonkvrije onderdelen
Basismateriaal:	Staal, gietijzer, gietstaal
Opspuitproces:	Elektrisch
Voorbehandeling:	Ontvetten, stralen
Opspuitmateriaal:	
- draad, diameter:	1,6 mm
- type	Cu-AlFe 9-1
Laagdikte:	0,5 mm
Nabehandeling:	Phenolsealer

Bijzonderheden: In het bijzonder toegepast in de off shore en op vorken van heftrucks in de meelindustrie

Produkt:	Asbus, afmetingen Ø 1050 x 1000 mm (figuur 7.25)
Toepassing:	Staalwalserij
Deklaagfunctie:	Slijtage
Basismateriaal:	Gietstaal
Opspuitproces:	Elektrisch en autogeen-draad spuiten
Voorbehandeling:	Voordraaien, ontvetten en stralen
Voorwarmtemperatuur:	80°C
Tussenlaag:	Geen
Opspuitmateriaal:	
- draad, diameter:	Elektrisch 1,6 mm; autogeen 3,2 mm
- type	Fe-Cr 13 (AISI 410)
Laagdikte:	4,5 mm
Nabehandeling:	Slijpen

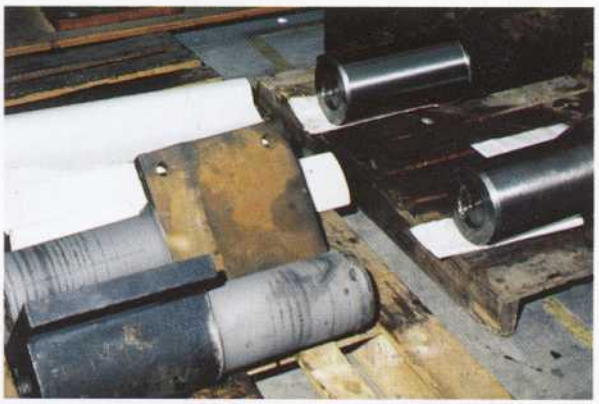
Produkt:	Rotor van vulmachine, diameter 1200 mm (figuur 7.26)
Toepassing:	Levensmiddelenindustrie
Deklaagfunctie:	Slijtage
Basismateriaal:	AISI 304
Opspuitproces:	Elektrisch
Voorbehandeling:	Voordraaien, ontvetten en stralen
Voorwarmtemperatuur:	80°C
Tussenlaag:	Geen
Opspuitmateriaal:	
- draad, diameter:	1,6 mm
- type	Cu-AlFe 9-1
Laagdikte:	2 mm
Nabehandeling:	Draaien

Bijzonderheden: De rotor loopt tegen teflon blokken. In bedrijf ontstaat ketelsteen op de rotor dat met een agressief schoonmaak-ontsmettingsmiddel wordt verwijderd



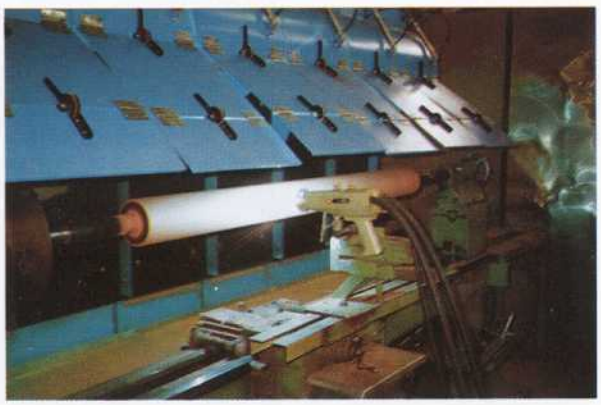
Produkt:	Krukastappen van hogedruk compressor (figuur 7.27)
Toepassing:	Procesindustrie
Deklaagfunctie:	Slijtage
Basismateriaal:	Gelegeerd staal
Opspuitproces:	Elektrisch
Voorbehandeling:	Voorslijpen, ontvetten en stralen
Voorwarmtemperatuur:	80°C
Tussenlaag:	Geen
Opspuitmateriaal:	
- draad, diameter:	1,6 mm
- type	Fe-Cr 13 (AISI 410)
Laagdikte:	1,5 mm
Nabehandeling:	Slijpen en phenol sealer aanbrengen

Produkt:	Inktrol van off-set pers, afmetingen Ø 140 x 1300 mm (figuur 7.28)
Toepassing:	Grafische industrie
Deklaagfunctie:	Slijtage
Basismateriaal:	Staal C-45
Opspuitproces:	Elektrisch
Voorbehandeling:	Voordraaien, ontvetten en stralen
Voorwarmtemperatuur:	80°C
Tussenlaag:	Geen
Opspuitmateriaal:	
- draad, diameter:	1,6 mm
- type	Fe-CrNiMn 19-9,5 (AISI 304)
Laagdikte:	1,5 mm
Nabehandeling:	Slijpen



Produkt:	Draaipunten van sluisdeuren (figuur 7.29)
Toepassing:	Waterkering
Deklaagfunctie:	Slijtage
Basismateriaal:	Gietstaal
Opspuitproces:	Elektrisch
Voorbehandeling:	Voordraaien, ontvetten, stralen, maskeren
Voorwarmtemperatuur:	60°C
Bedrijfstemperatuur:	Buitenwatertemperatuur
Tussenlaag:	Geen
Opspuitmateriaal:	
- draad, diameter:	1,6 mm
- type	Fe-Cr 13 (AISI 410)
Laagdikte:	1 mm
Nabehandeling:	Slijpen

Produkt:	Boorplatform (figuur 7.30)
Toepassing:	Off shore industrie
Deklaagfunctie:	Corrosiebescherming tegen zeewater
Basismateriaal:	Constructiestaal
Opspuitproces:	Elektrisch
Voorbehandeling:	Ontvetten en stralen
Bedrijfstemperatuur:	Zeewatertemperatuur
Tussenlaag:	Geen
Opspuitmateriaal:	
- draad, diameter:	1,6 mm
- type	Al 99,0
Laagdikte:	0,1 mm
Nabehandeling:	Geen



Produkt:	Drukrol (figuur 7.31)
Toepassing:	Grafische industrie
Deklaagfunctie:	Slijtage
Basismateriaal:	C-staal
Opspuitproces:	Elektrisch
Voorbehandeling:	Ontvetten, voordraaien, ontvetten, stralen en maskeren
Voorwarmtemperatuur:	60°C, max. 80°C
Tussenlaag:	Geen
Opspuitmateriaal:	
- draad, diameter:	1,6 mm
- type	Cu 99,8
Laagdikte:	1,0 mm
Nabehandeling:	Slijpen

Produkt:	Remtrommel (figuur 7.32)
Deklaagfunctie:	Slijtage
Opspuitproces:	Elektrisch
Voorbehandeling:	Ruw voordraaien en/of stralen, ontvetten
Voorwarmtemperatuur:	Geen
Tussenlaag:	Ni-Al 5
Opspuitmateriaal:	
- draad, diameter:	1,6 mm
- type	Pseudo legering Fe-Cr 13 (AISI 410) + C-staal
Laagdikte:	2 mm
Nabehandeling:	Slijpen

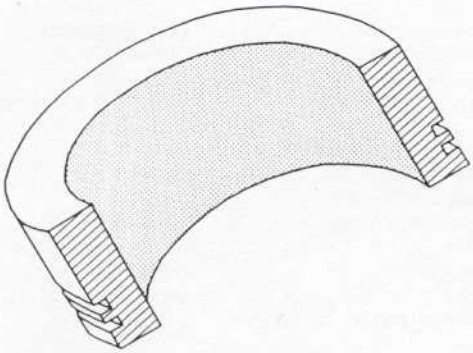
Produkt:	Zuiger (figuur 7.33)
Toepassing:	Dieselmotoren
Deklaagfunctie:	Slijtage
Opspuitproces:	Elektrisch
Voorbehandeling:	Ruw voordraaien en/of stralen, ontvetten
Voorwarmtemperatuur:	Geen
Tussenlaag:	Geen
Opspuitmateriaal:	
- draad, diameter:	1,6 mm
- type	Cu-Al 7 (fosforbrons)
Laagdikte:	Niet bekend
Insmelten:	Geen
Nabehandeling:	Slijpen

Produkt:	Astappen (figuur 7.34)
Toepassing:	Spoorwegen
Deklaagfunctie:	Slijtage
Opspuitproces:	Elektrisch
Voorbehandeling:	Voordraaien en/of stralen, ontvetten
Voorwarmtemperatuur:	Geen
Tussenlaag:	Ni-Al 5
Opspuitmateriaal:	
- draad, diameter:	1,6 mm
- type	Fe-Cr 13 (AISI 410)
Nabehandeling:	Slijpen

7.6 *Plasmaspuiten*

Produkt:	Zuiger (figuur 7.35)
Toepassing:	Scheepsmotoren
Deklaagfunctie:	Hoogtemperatuurcorrosie
Basismateriaal:	Gietijzer
Opspuitproces:	Plasma
Voorbehandeling:	Stralen
Voorwarmtemperatuur:	Geen
Tussenlaag:	Ni-Al 5, dikte 0,1 mm als hechtlaag en Al_2O_3-Ni/Al 70-30 als tussenlaag
Opspuitmateriaal: poeder, type	Al_2O_3-TiO_2-SiO_2 94-2,5
Nabehandeling:	Geen

Bijzonderheden: Laag dient ter voorkoming van hittescheuren en het verlagen van de temperatuur van de bovenste zuigerveer



Produkt:	Zuiger, binnenzijde (figuur 7.36)
Toepassing:	Scheepsmotoren
Deklaagfunctie:	Slijtage en herstellen van maatvoering
Basismateriaal:	Gietijzer
Opspuitproces:	Plasma
Voorbehandeling:	Warm ontvetten, schoondraaien, scherpe kanten breken, stralen en maskeren
Voorwarmtemperatuur:	90-120°C, werktemperatuur max. 175°C. Werkstuk koelen.
Tussenlaag:	Hechtlaag Ni-Al-Mo 90-5,5, dikte 100-150 µm
Opspuitmateriaal: poeder, type	Fe-MoC 79-18
Laagdikte:	Na bewerken max. 1,3 mm
Nabehandeling:	Slijpen met SiC-schijven

Produkt:	Zuiger (figuur 7.37)
Toepassing:	Motoren
Deklaagfunctie:	Hogetemperatuuroxydatie en thermische barrière
Basismateriaal:	Gietijzer
Opspuitproces:	Plasma
Voorbehandeling:	Warm ontvetten, stralen, kanten breken, maskeren
Voorwarmtemperatuur:	90-120°C, werktemperatuur max. 175°C
Tussenlaag:	Ni-CrAlCoY 74-18, laagdikte 100-150 µm
Opspuitmateriaal: poeder, type	ZrO_2-CaO 93-5
Laagdikte:	Max. 1,3 mm na bewerken
Nabehandeling:	Geen

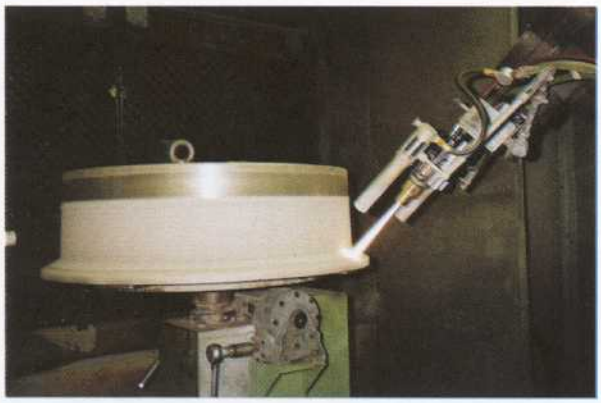
Produkt:	Zuigerstang (figuur 7.38)
Toepassing:	Hydrauliek
Deklaagfunctie:	Slijtage
Basismateriaal:	Roestvast staal
Opspuitproces:	Plasma
Voorbehandeling:	Ontvetten, maskeren, stralen
Voorwarmtemperatuur:	100°C, max. 150°C
Bedrijfstemperatuur:	30°C
Tussenlaag:	Ni-Cr 20
Opspuitmateriaal: poeder, type	Cr_2O_3-SiO_2 92-5
Laagdikte:	0,3 mm
Nabehandeling:	Slijpen

Produkt:	Onderdelen van pomp (figuur 7.39)
Toepassing:	Pompen
Deklaagfunctie:	Slijtage
Basismateriaal:	Roestvast staal
Opspuitproces:	Plasma
Voorbehandeling:	Ontvetten, voordraaien, ontvetten en stralen
Voorwarmtemperatuur:	100°C, max. 120°C
Bedrijfstemperatuur:	60°C
Tussenlaag:	Ni-Cr 20
Opspuitmateriaal: poeder, type	Cr_2O_3-SiO_2 92-5
Laagdikte:	0,2 mm
Nabehandeling:	Superfijnen

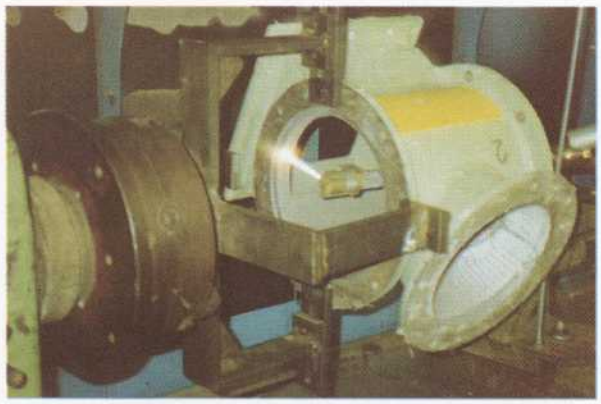
Produkt:	Straalmotor, buitenzijde verbrandingskamer (figuur 7.40)
Toepassing:	Luchtvaart
Deklaagfunctie:	Hogetemperatuuroxydatie
Basismateriaal:	Hastelloy X
Opspuitproces:	Plasma
Voorbehandeling:	Ontvetten, maskeren, stralen met aluminiumoxyde
Voorwarmtemperatuur:	Tijdens het spuiten 150 - 200°C
Tussenlaag:	Ni-Al 5, dikte 100 - 150 µm
Opspuitmateriaal: poeder, type	ZrO_2-MgO 76-24
Laagdikte:	0,25 - 0,35 mm
Nabehandeling:	Geen

7.7 *HVOF-spuiten*

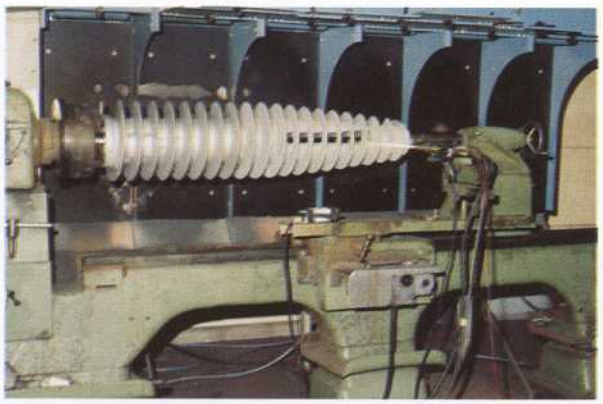
Produkt:	Lagerbus (figuur 7.41)
Toepassing:	Geleiding
Deklaagfunctie:	Slijtage
Basismateriaal:	Roestvast staal
Opspuitproces:	HVOF
Voorbehandeling:	Ontvetten, maskeren, stralen
Voorwarmtemperatuur:	60°C
Bedrijfstemperatuur:	Kamertemperatuur
Tussenlaag:	Geen
Opspuitmateriaal: poeder, type	WC-Co 83-17
Laagdikte:	0,2 mm
Nabehandeling:	Borstelen



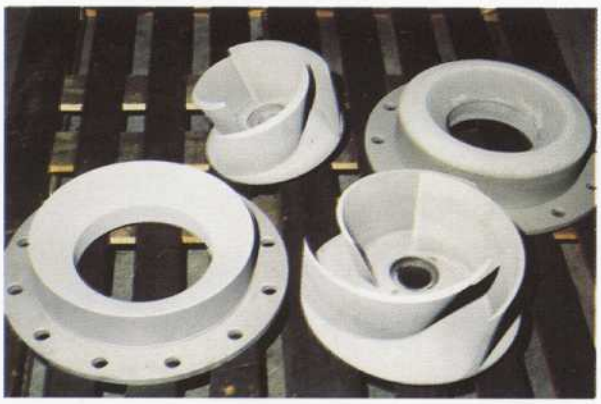
Produkt:	Draadstrektrommel (figuur 7.42)
Toepassing:	Draadindustrie
Deklaagfunctie:	Slijtage
Basismateriaal:	Gehard staal
Opspuitproces:	HVOF
Voorbehandeling:	Ontvetten, stralen
Voorwarmtemperatuur:	60°C
Bedrijfstemperatuur:	20°C
Tussenlaag:	Geen
Opspuitmateriaal: poeder, type	WC-Co 88-12
Laagdikte:	0,2 mm
Nabehandeling:	Geen



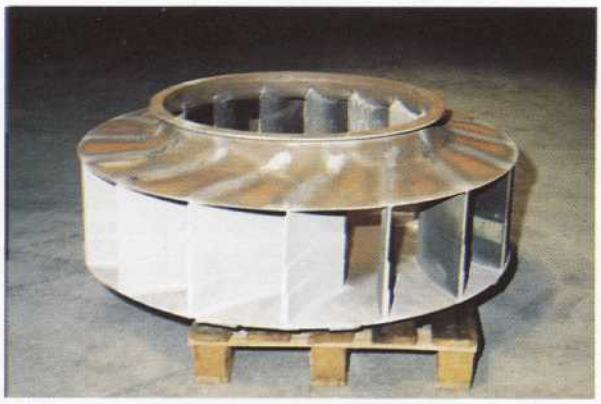
Produkt:	Huis van doseersluis (figuur 7.43)
Toepassing:	Voedingsindustrie
Deklaagfunctie:	Slijtage
Basismateriaal:	Gietstaal
Opspuitproces:	HVOF
Voorbehandeling:	Voordraaien, ontvetten, stralen
Voorwarmtemperatuur:	60°C
Bedrijfstemperatuur:	20°C
Tussenlaag:	Geen
Opspuitmateriaal: poeder, type	WC-Co 88-12
Laagdikte:	0,15 mm
Nabehandeling:	Borstelen
Bijzonderheden:	Het aanbrengen van de deklaag is preventief



Produkt:	Transportschroef (figuur 7.44)
Toepassing:	Baggerindustrie
Deklaagfunctie:	Slijtage
Basismateriaal:	Gehard staal
Opspuitproces:	HVOF
Voorbehandeling:	Ontvetten, stralen
Voorwarmtemperatuur:	60°C
Bedrijfstemperatuur:	Buitenwater
Tussenlaag:	Geen
Opspuitmateriaal: poeder, type	WC-Co 88-12
Laagdikte:	0,15 mm
Nabehandeling:	Geen



Produkt:	Pompwaaier (figuur 7.45)
Toepassing:	Waterzuivering
Deklaagfunctie:	Slijtage
Basismateriaal:	Gietijzer
Opspuitproces:	HVOF
Voorbehandeling:	Ontvetten, stralen
Voorwarmtemperatuur:	60°C, max. 80°C
Bedrijfstemperatuur:	Buitenwater
Tussenlaag:	Geen
Opspuitmateriaal: poeder,type	WC-Co 88-12
Laagdikte:	0,1 mm
Nabehandeling:	Geen



Produkt:	Waaier van ventilator (figuur 7.46)
Toepassing:	Luchtbehandeling
Deklaagfunctie:	Slijtage
Basismateriaal:	Laag C-staal
Opspuitproces:	HVOF
Voorbehandeling:	Ontvetten,stralen
Voorwarmtemperatuur:	60°C
Bedrijfstemperatuur:	300°C
Tussenlaag:	Geen
Opspuitmateriaal: poeder,type	Cr_3C_2-NiCr 80-20
Laagdikte:	0,1mm
Nabehandeling:	Geen

Hoofdstuk 8

Afnamecontrole van opgespoten lagen

8.1 Algemeen

Het testen van thermisch gespoten deklagen is complexer dan het testen van materialen in vaste of staafvorm. Deklagen zijn dun en dat vergt specifieke testen en proefstaafvormen. De methoden zijn dan ook duurder dan die toegepast bij bulkmateriaal. Veelal zal pas tot een uitgebreide beproeving worden overgegaan indien de toepassing dat vereist. In de Nederlandse normen bestaan geen algemeen aanvaarde afnameregels. Een aantal beproevingsmethoden staat wel omschreven in diverse internationale normen zoals DIN en de AWS. De controlemaatregelen komen dan ook tot stand in overleg tussen opdrachtgever en uitvoerder.
De eisen die men stelt aan de testresultaten zijn:
- reproduceerbaarheid;
- voorspellen van de praktische inzetbaarheid van de deklaag.

Testmethoden

Voor het destructief testen van thermisch gespoten deklagen staat een aantal gestandaardiseerde testen ter beschikking. Alvorens echter tot het testen van deklagen over te gaan, is het aan te raden van de gespoten deklaag eerst een dwarsdoorsnede te maken. Hierdoor wordt in ieder geval een indruk verkregen van de mate van hechting op het substraat en de structuur van de laag zelf.
De testmethoden welke ons ter beschikking staan zijn ingedeeld naar de eigenschappen (zie tabel 8.1).

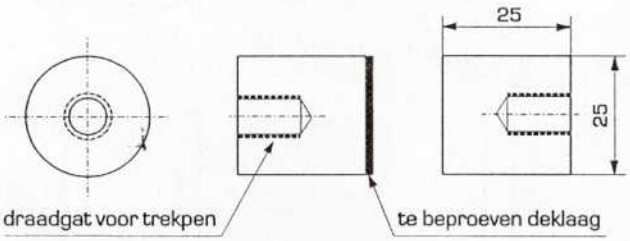
tabel 8.1 Testmethoden ingedeeld naar eigenschappen

Mechanische eigenschappen	Deklaagbeproevingen i.v.m. het gebruik
Hechtsterkte	Abrasietest
Treksterkte	Straalerosietest
Afschuifsterkte	Krasvastheidstest
Macrohardheid	Porositeitsmeting
Microhardheid	Luchtoxidatietest
	Gasdoorlaatbaarheidstest
	Atmosfeertesten

8.2 Mechanische eigenschappen

8.2.1 Hechtsterkte

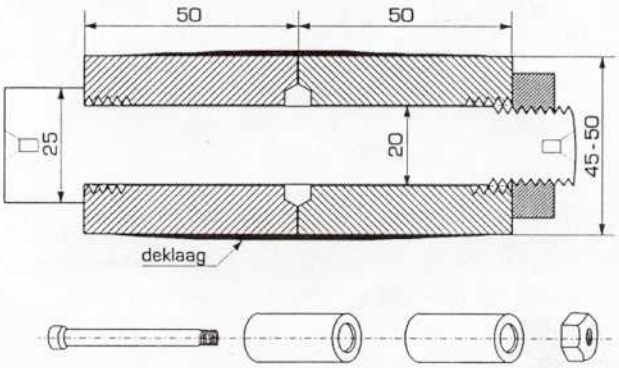
Deze test bestaat uit het aanbrengen van een deklaag op één zijde van een proefstuk, het verlijmen van die gespoten deklaag aan een trekstaaf en het registreren van de kracht die nodig is om proefstuk en trekstaaf van elkaar los te trekken. De proefstaafvorm is schematisch weergegeven in figuur 8.1. Deze testmethode is bruikbaar om hechtwaarden te meten tussen deklaag en substraat tot aan een waarde van 80 N/mm^2.



figuur 8.1 Proefstukken voor hechtsterktebepaling

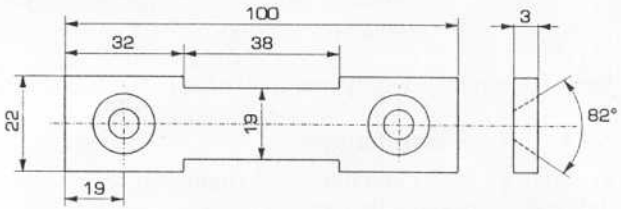
8.2.2 Treksterkte

Om de treksterkte van thermisch gespoten deklagen te meten, worden twee verschillende methoden van voorbewerking van het proefstukje toegepast.
Bij methode A (figuur 8.2) wordt op twee door middel van een trekbout aan elkaar gekoppelde pijpjes een deklaag gespoten. Na het verwijderen van de trekbout wordt aan de pijpjes getrokken.



figuur 8.2 Beproeving van de treksterkte met methode A

Bij methode B (figuur 8.3) wordt op een vlak proefstukje een deklaag gespoten. Na het opbrengen van de laag wordt in het midden van het proefstukje een deel van het substraat door een machinale bewerking verwijderd, zodat hier de deklaag "overblijft" (figuur 8.4).

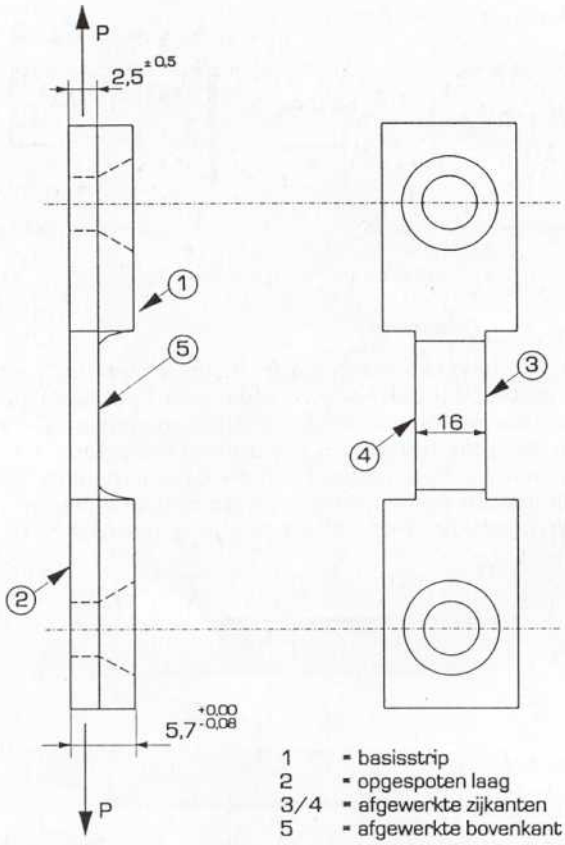


figuur 8.3 Basisstrip voor het opbrengen van de deklaag voor methode B

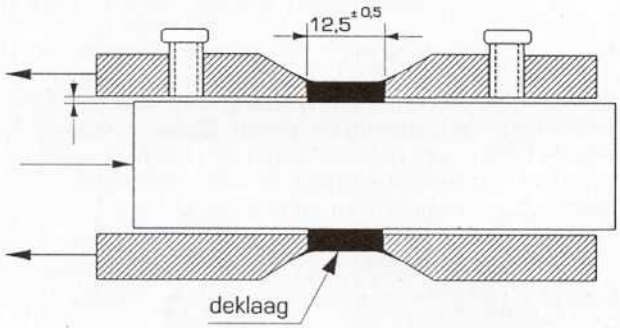
De kracht nodig om de deklaag kapot te trekken is in beide gevallen een maat voor de treksterkte van de thermisch gespoten deklaag.

8.2.3 Afschuifsterkte

Bij deze test wordt een deel van een cilindrisch proefstaafje, zoals weergegeven in figuur 8.5 met een deklaag bedekt. Vervolgens wordt er in axiale richting een kracht op uitgeoefend om de deklaag van de cilinder te schuiven. De kracht die hiervoor nodig is, is een maat voor de schuifspanning.



figuur 8.4 De bewerkte proefstaaf volgens methode B



figuur 8.5 Proefopstelling schuifsterktebepaling

8.2.4 *Hardheidsmetingen*

Er zijn twee typen van hardheidsmetingen voor deklagen te onderscheiden, namelijk:

1. het meten van de hardheid van de deklaag, macrohardheid;
2. het meten van de hardheid van één specifiek gebied van de deklaag met behulp van een micropreparaat, microhardheid.

- **Macrohardheid**
  Bij deze testmethode meet men de grootte van de indrukking die ontstaat als een indruklichaam met een bepaalde kracht op de deklaag wordt gedrukt. Een veel toegepaste methode is de hardheidsmeting volgens Rockwell.
  De resultaten van de metingen worden onder andere gebruikt om de effecten te onderzoeken van verschillende spuittechnieken op de deklaageigenschappen.

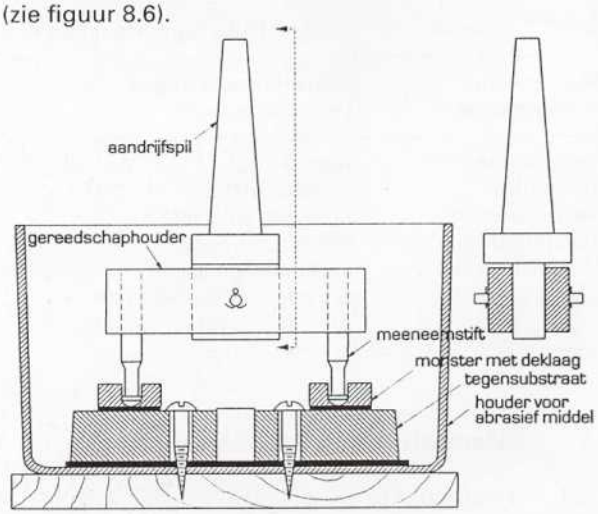
- **Microhardheid**
  Hierbij wordt een microhardheidstester gebruikt, waarbij met een geringe belasting wordt gewerkt. Algemeen wordt voor metalen deklagen een belasting van 50 gram, en voor keramische deklagen een belasting van 200 gram gebruikt. Om een betrouwbaar resultaat te verkrijgen, dient er op minimaal 15 verschillende plaatsen te worden gemeten. Deze testmethode wordt gebruikt om de slijtageweerstand van de deklaag te voorspellen en om de structuur van de gespoten deklaag te bestuderen.

8.3 *Deklaageigenschappen in verband met het gebruik*

Een aantal beproevingsmethoden is ontwikkeld om een voorspelling te kunnen doen omtrent het gedrag van de deklaag in de praktijk. Deze methoden zijn gericht op aspecten als slijtage en corrosie.

8.3.1 *Abrasietest*

Het doel van deze test is het meten van de weerstand die een deklaag biedt tegen abrasieve slijtage. Zo kan men deklagen van hetzelfde uitgangsmateriaal, maar op verschillende wijze opgebracht, vergelijken. De beproeving bestaat uit het blootstellen van een thermisch gespoten deklaag aan een van tevoren gedefinieerde slurry, waarbij na een vastgestelde tijd het gewichtsverlies van de deklaag wordt gemeten. Het is een test die wordt gebruikt om eigenschappen van deklagen te vergelijken, bijvoorbeeld een plasmagespoten deklaag met een deklaag van hetzelfde materiaal, alleen dan autogeen verspoten. Heel gebruikelijk is deze test om de abrasieweerstand van insmeltlegeringen te meten (zie figuur 8.6).



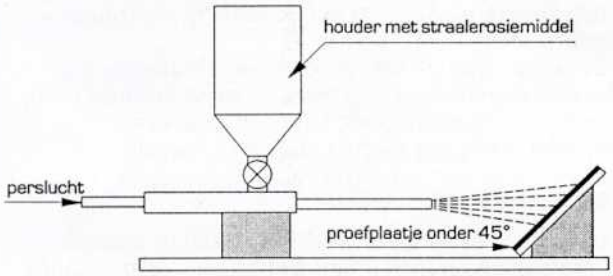
figuur 8.6 Proefopstelling voor het vaststellen van de abrasieslijtage

Bij de proef worden proefstukken door middel van een drukdraaimechanisme over een tegenmateriaal bewogen, waarbij zich tussen proefstukken en tegenmateriaal een abrasieve slurry bevindt. Na een vastgestelde tijd wordt het gewichtsverlies van de deklaag gemeten.
De resultaten van slijtage en abrasietesten moeten voorzichtig worden gehanteerd vanwege de vele

procesvariabelen. Toegespitst op specifieke bedrijfsomstandigheden kunnen zij echter waardevolle informatie verschaffen.

8.3.2 *Straalerosietest*

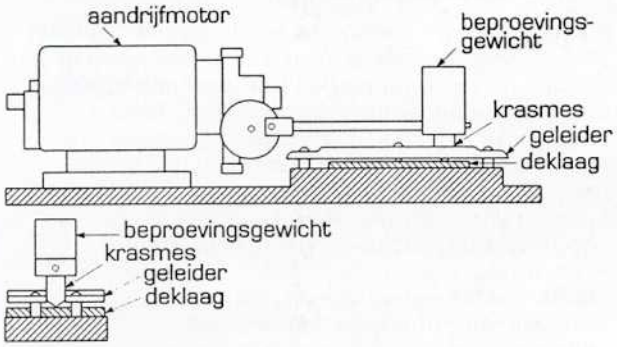
Het doel van deze proef is het verkrijgen van een inzicht omtrent de erosiebestendigheid van deklagen.
Deze test bestaat uit het meten van de hoeveelheid straalmiddel die nodig is om de deklaag te verwijderen. In figuur 8.7 is een opstelling van de straalerosietest weergegeven.



figuur 8.7 Opstelling van de straalerosietest

8.3.3 *Krasvastheidstest*

Het doel van deze proef is het bepalen van de krasvastheid van deklagen bij verschillende procesparameters zoals voorbewerking, procesvorm, deklaagmateriaal, nabewerking en dergelijke. De proef bestaat uit het meten van de diepte en/of breedte van een kras in een deklaag, gemaakt door een mechanisch heen en weer gaande beweging van een gedefinieerd kraslichaam (zie figuur 8.8).



figuur 8.8 Proefopstelling voor het bepalen van de krasvastheid

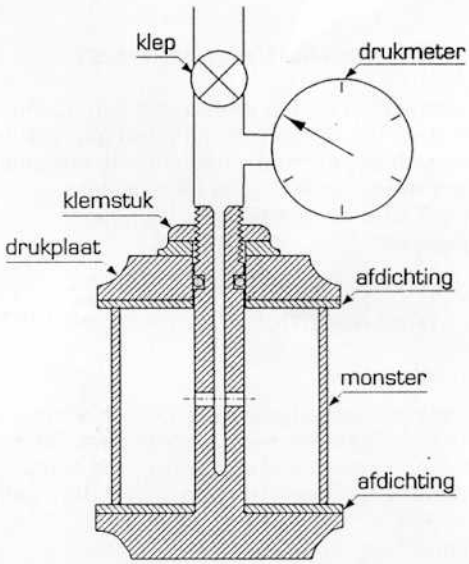
Voor wat betreft het testen van slijtwillige lagen, is de meest bekende test de krashardheidstest (de Hoffman scratch-hardness). Hierbij wordt een wagentje voorzien van een kraspen met een vooraf ingesteld gewicht met de hand voortbewogen over de te testen spuitlaag. De krasbreedte is een mate voor de 'slijtwilligheid'. Ook de hoeveelheid porositeit en oxydes in de laag is een mate voor de 'slijtwilligheid'. Beide proeven werken volgens hetzelfde principe; het maken van een gedefinieerde kras in de opgespoten laag.

8.4 *Corrosietesten*

Het is mogelijk enige voorspelling te doen over het gedrag van deklagen in een bepaald milieu over een langere periode. Hiervoor worden verschillende testen gebruikt, waarvan een aantal ook is genormaliseerd. Het uitvoeren van de proeven kan worden omschreven in een door de opdrachtgever te stellen specificatie van eisen.

8.4.1 *Luchtoxydatietest*

Het doel van deze proef is het meten van de bestendigheid van een deklaag tegen oxydatie in hete lucht.
De proef bestaat uit het blootstellen van een deklaag aan verhoogde luchtdruk bij een hoge temperatuur, waarbij vervolgens de gewichtsveranderingen worden geregistreerd als functie van de expositietijd. De opzet van de proefopstelling is weergegeven in figuur 8.9



figuur 8.9 Opstelling voor de luchtoxydatietest

8.4.2 *Testen in corrosieve milieus*

De twee belangrijkste omstandigheden waarin deklagen kunnen worden beproefd, zijn een industrieel- en een zeewatermilieu. De beproeving volgens het industriële klimaat wordt uitgevoerd met de Kesternich-test. Hierbij wordt SO_2 als atmosfeer gebruikt. De test staat omschreven in ISO 3221 en DIN 50018.
De tweede test is de zoutsproeitest voor het beproeven van deklagen in een zee-atmosfeer. Deze test staat omschreven in onder andere DIN 50021 en enkele ASTM-normen. Hiervan komt ASTM B 117-73 overeen met de hier genoemde DIN-norm. De hierin beschreven beproeving schrijft onder andere voor dat een 5% NaCl-oplossing in gedestilleerd water van 35°C gedurende een vooraf vast te stellen tijd continu op de proefstukken moet worden gesproeid. De beproevingstijd kan, volgens DIN, variëren tussen 16 en 700 uur. Tussentijdse inspectie kan in het beproevingsschema worden opgenomen.
Aan de 5% NaCl-oplossing kunnen chemicaliën worden toegevoegd, waaronder ijsazijn en/of koperchloride. Deze proeven staan omschreven in

onder andere ASTM B 287-62 en ASTM 368-68T. Voor de hierboven beschreven beproevingen zijn complete installaties in de vorm van transportabele kamers verkrijgbaar.

8.5 *Porositeitsmeting*

Deze meting vergelijkt de ware dichtheid (Pw) van het materiaal met de berekende dichtheid (Pb) van de deklaag. De berekende dichtheid bereikt men door gewichtsbepaling en volumebepaling op elkaar te delen zoals hieronder omschreven:

$$\frac{\text{Massa van een proefstukje met deklaag minus de massa van het niet beklede proefstukje (in g)}}{\text{Volume van het proefstukje met deklaag minus het volume van het onbedekte proefstukje (in cc)}}$$

In formulevorm is de porositeit: $P = \frac{Pw - Pb}{Pw} \cdot 100\%$

8.6 *Gasdoorlaatbaarheidstest*

Deze test bestaat uit het meten van een gasflow door een deklaag. Het is een test die goed geschikt is om de doorlaatbaarheid van verschillende materialen en spuittechnieken onderling te vergelijken.
In figuur 8.10 is de opstelling schematisch weergegeven.

8.7 *Niet destructief onderzoek (NDO)*

8.7.1 *Algemeen*

NDO-onderzoeksmethoden worden voor opgespoten lagen in het algemeen weinig toegepast. De meest in aanmerking komende methoden zijn te splitsen in:
- methoden voor opsporen van uitwendige gebreken:
  - visueel
  - penetrant
- methoden voor opsporen van inwendige gebreken:
  - radiografisch onderzoek
  - ultrasoon onderzoek

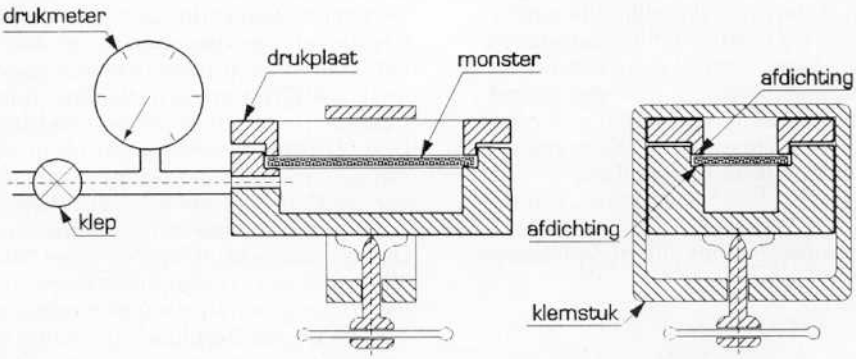
Het niet destructief onderzoek van thermisch gespoten lagen is in het algemeen beperkt tot eenvoudig uit te voeren testen. Dat wordt veroorzaakt door de geringe dikte waarin lagen worden opgespoten in relatie tot de dikte van het substraat. Aanwezige defecten zijn moeilijk detecteerbaar door methoden als bijvoorbeeld radiografisch en ultrasoon onderzoek.
Zeker is het met de standaardmethoden niet mogelijk een betrouwbare indicatie te krijgen omtrent de hechting van een laag op het substraat. Daarvoor is de afstand van de spuitlaag naar het substraat te gering, ook al zou de laag ogenschijnlijk goed gehecht lijken te zijn op het substraat. In de lastechniek wordt dit verschijnsel een bindingsfout genoemd, die door loodrechte meting op het werkstuk (radiografisch of ultrasoon) niet of moeilijk zal worden opgemerkt; de overgang is te transparant.
Het maken van een microscopische doorsnede geeft over de hechting, hoewel plaatselijk, de meest betrouwbare en meest eenvoudige te verkrijgen informatie.
De betrouwbaarheid van de kwaliteit van een opgespoten laag wordt het best gewaarborgd door de spuitprocedure goed te specificeren en van proefstukken een kwalificatie uit te voeren.

8.7.2 *Visuele inspectie*

Onder visueel onderzoek dient hierbij te worden verstaan onderzoek op indicaties aan het oppervlak van de opgespoten laag, waarbij behalve van het ongewapende oog slechts gebruik mag worden gemaakt van een loep en metrische instrumenten ter bepaling van de afmetingen.
In het algemeen zullen de deklagen bij de visuele inspectie worden getoetst op:
a. oppervlaktegesteldheid (slecht uitziende lagen);
b. oppervlaktescheuren;
c. porositeit;
d. geometrische afwijkingen zoals een overmatige of ondermaatse laagdikte.

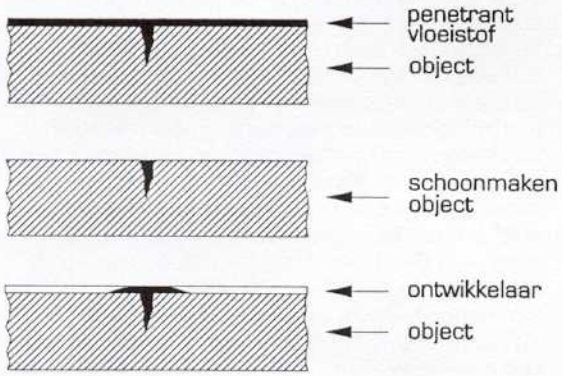
8.7.3 *Penetrant onderzoek*

Bij het penetrant onderzoek wordt gebruik gemaakt van een vloeistof die gemakkelijk in een opening aan het oppervlak dringt en zich ook weer laat opzuigen door een zogenoemde "ontwikkelaar". Deze onderzoeksmethode wordt vooral toegepast om oppervlakteporositeit en scheuren aan te tonen.
Het penetrerend vermogen van een penetrant systeem is onder meer afhankelijk van:
- oppervlakteruwheid van het te inspecteren voorwerp;
- oppervlakteruwheid van de fout;
- capillair vermogen van de penetrant;
- uitvloeiingsvermogen van de penetrant.



figuur 8.10 Opstelling voor de gasdoorlaatbaarheidstest

Het meest belangrijke deel van het penetrant onderzoek is het schoonmaken vooraf van het te onderzoeken gebied. De opgespoten laag moet vrij zijn van vet, vuil en dergelijke. Ook moet vloeistof (van schoonmaken) uit de eventueel aanwezige defecten worden verwijderd. In figuur 8.11 is het principe van het penetrant onderzoek weergegeven.



figuur 8.11 Principe van het penetrant onderzoek

De penetrant vloeistof kan met een spuitbus of kwast op het oppervlak worden aangebracht. Ook is het mogelijk de voorwerpen in de penetrant onder te dompelen.
Nadat de penetratietijd (15 tot 20 minuten) is verstreken, moet het oppervlak goed worden schoongemaakt en wordt de ontwikkelaar zodanig aangebracht, dat het oppervlak gelijkmatig met een dun laagje is bedekt.
Penetrant systemen zijn in twee hoofdgroepen te onderscheiden, namelijk:

a. penetranten met een rode kleurstof voor het bereiken van een kleurcontrast met de te gebruiken ontwikkelaar;
b. penetranten met een fluorescerende kleurstof voor het bereiken van een licht-donker contrast.

Bij een globale vergelijking van beide groepen kunnen we stellen dat bij het onderzoek met fluorescerende vloeistof zeer kleine foutindicaties worden gevonden, maar daar staat tegenover dat voor de beoordeling meer ervaring is vereist en dat aan speciale omgevingscondities moet worden voldaan. Het onderzoek moet in een verduisterde ruimte worden uitgevoerd.

8.7.4 *Ultrasoon onderzoek*

Met behulp van ultrageluidsgolven die door een ultrasoon taster worden uitgezonden en ontvangen, kunnen foutindicaties in deklagen worden opgespoord. Gezien de in het algemeen geringe laagdikten ten opzichte van die van het substraat en de aard van de geluidsgolven, zijn defecten op het grensvlak (bindingsfouten) in principe wel aan te tonen, maar dat vergt een grote kennis van de keuze van het type taster, te gebruiken geluidsfrequentie en de interpretatie van het schermbeeld. Door gebruik te maken van ijkmonsters met bekende defecten kunnen op vergelijkbare werkstukken defecten worden aangetoond. Wanneer de geometrie van het werkstuk afwijkt van die van de ijkmonsters, is een goede interpretatie nauwelijks mogelijk.

8.7.5 *NDO-ontwikkelingen*

De behoefte aan een NDO-methode voor het vaststellen van de kwaliteit van een opgespoten laag is duidelijk aanwezig. De betrouwbaarheid van de voorhanden zijnde methoden voor het vaststellen van inwendige defecten is matig. Er doen zich wel ontwikkelingen voor om toch tot een betrouwbaar testresultaat te komen.
Zonder uitzondering bevinden deze nieuwe methoden zich nog in een ontwikkelingsstadium en zijn alleen op laboratoriumschaal beproefd. Een voorbeeld hiervan zijn de thermografische methoden die onregelmatigheden in de warmtestroom van een verwarmd proefobject kunnen vaststellen. Hiermee kunnen de dikte, bindingsfouten en scheurvorming van een laag worden vastgesteld. Het zijn tijdrovende methoden en de proefstukafmetingen zijn relatief beperkt.
Een andere methode is de akoestisch emissietechniek. Een reeds vele jaren bekende meetmethode voor het detecteren van spanningsgolven voortkomende uit het materiaal. Deze golven worden voortgebracht door veranderingen in de structuur van het opgespoten materiaal en dan overgedragen aan een taster en vervolgens versterkt. De verkregen signalen zijn verwarrend en interpretatie daarvan is daardoor moeilijk. De akoestische techniek leidt zelden tot een echt betrouwbare praktische toepassing. Zeker niet bij opgespoten lagen, vanwege de grote variëteit in opspuittechnieken en materialen.
Resulterend kan worden gesteld dat voorlopig niet moet worden verwacht dat, anders dan de hiervoor genoemde eenvoudige testmethoden, op korte of middellange termijn een wezenlijke verandering in het hiervoor geschetste beeld zal optreden.

Hoofdstuk 9

Inrichting van de werkplaats en automatisering

9.1 Te installeren apparatuur

In een spuitwerkplaats treft men in het algemeen de volgende apparatuur en installaties aan:

- **Spuitapparatuur**

  Hierbij kan de keuze worden gemaakt uit het autogeen draad- en poederspuiten, het elektrisch spuiten en het plasmaspuiten. Modificaties van deze processen geven mogelijkheden voor het behalen van een hogere kwaliteit, bijvoorbeeld het HVOF- en het lagedruk plasmaspuiten.
  Voor het laten werken van de apparatuur is energie nodig in de vorm van gassen, elektriciteit en perslucht. Perslucht wordt ook gebruikt voor het koelen van het substraat gedurende het spuiten.

  - *Gasvoorziening*
    In principe kan worden gewerkt met enkelvoudige cilinders, voor elk gas één. Dat is niet aan raden. Beter is het de gasvoorziening te laten verzorgen via een (bij voorkeur buiten de werkplaats opgestelde) centrale flessenbatterij. Het gas gaat vervolgens via een leidingsysteem met op regelmatige afstanden aanwezige aansluitnippels naar de verschillende werkplekken. Op het gewenste aansluitpunt wordt dan een werkmanometer aangebracht. Met zo'n systeem is de continuïteit van de gasvoorziening het beste gewaarborgd. Bij afname van grote hoeveelheden van bijvoorbeeld zuurstof en stikstof is een tank, voor opslag van het vloeibare gas, het meest economisch.
    Voor het autogeen spuiten is per apparaat een afname van zuurstof van maximaal 2 m^3/uur en van acetyleen van 1 m^3/uur te verwachten. Voor het plasmaspuiten wordt meestal gebruik gemaakt van stikstof en waterstof waarvoor respectievelijk circa 2 en 0,7 m^3/uur nodig is.

  - *Elektriciteit*
    Voor het elektrisch en het plasmaspuiten is doorgaans respectievelijk 10 en 40 kW aansluitvermogen nodig. bij het elektrisch spuiten kan dan met een installatie van 500 A worden gewerkt.

  - *Perslucht*
    Een onderschatte factor is de behoefte en kwaliteit van de benodigde perslucht. Deze wordt gebruikt voor het stralen, het spuiten en het koelen van het substraat.
    Daar waar de lucht nodig is voor het spuiten, moet worden gezorgd dat drukveranderingen door het stralen niet van invloed zijn op het gelijkmatig werken van de spuitapparatuur. Door het installeren van een buffervat kan dit probleem worden voorkomen. De perslucht dient droog en olievrij te zijn.
    De volgende capaciteiten zijn nodig voor de verschillende spuitprocessen:
    - Autogeen poederspuiten: 30 m^3/uur;
    - Autogeen draadspuiten: 60 m^3/uur;
    - Elektrisch boogspuiten: 90 m^3/uur;
    - Straalcabine: 80 m^3/uur bij 2 tot 5 bar.

- **Afzuigapparatuur**

  Deze kan bestaan uit een spuitcabine of afzuigmonden met een daaraan gekoppeld afzuigsysteem, een mobiel afzuigsysteem en cabines of afzuigmonden gekoppeld aan een centraal afzuigsysteem. In hoofdstuk 4.2 zijn de hierbij behorende geschatte globale kosten weergegeven. Een verschil van een factor tien in kosten kan het geval zijn. De voorkeur is uit te spreken voor een centraal afzuigsysteem met voldoende afzuigcapaciteit. Dit geeft een grote mate van flexibiliteit, het minste beslag op de ruimte en de zekerheid van voldoende capaciteit. Een capaciteit van 2.500 m^3/uur voor een mobiele afzuiginrichting tot 5 à 10.000 m^3/uur voor een cabine is gewenst.
  Een belangrijk onderdeel van de afzuiginstallatie is het filtersysteem. Door de toenemende milieu-eisen gaat dit deel van de apparatuur een steeds groter deel van de investering uitmaken.

- **Straalapparatuur**

  Aangezien het stralen in een afgesloten ruimte dient te gebeuren zijn er twee mogelijkheden. Het kan in de vorm van een cabine, waarin het produkt wordt geplaatst en waarbij de operator van buitenaf via geïntegreerde handschoenen het karwei uitvoert. Voor grote objecten worden straalkamers gebruikt waar de operator in een beschermende uitrusting het produkt straalt.

- **Koelluchtapparatuur**

  Ondanks het feit dat het thermisch spuiten tot de 'koude' processen behoort, is het toch vaak nodig dat het substraat wordt gekoeld. Hiervoor worden speciale koel-jets, soms in een batterij-opstelling, gebruikt.

- **Manipulatie-apparatuur**

  Het uit de hand spuiten zal plaatsvinden bij onder andere het opbrengen van corrosiewerende lagen op staalconstructies. Het meeste werk wordt uitgevoerd op produkten die kunnen worden gemanipuleerde. Dat waarborgt ook een betere kwaliteit.
  De meest voor de hand liggende zijn produkten die rotatiesymmetrisch zijn zoals assen. Voor normale eisen is de aanschaf van een gebruikte draaibank een verantwoorde keuze. Wanneer lange assen of cilinders met een grote nauwkeurigheid worden gespoten, dan moeten zwaardere eisen aan de draaibank worden gesteld. Factoren als trillingvrij zijn en eenparigheid van de bewegingen van het produkt en het spuitpistool zijn dan belangrijk.

- **Opslag van spuitmaterialen en straalmiddelen**

  Een aparte ruimte voor het overzichtelijk opslaan van spuitmaterialen en straalmiddelen is geen luxe. Zo'n ruimte moet bij voorkeur een

gelijkmatige temperatuur en een te regelen vochtigheidsgraad hebben. In ieder geval moet worden gezorgd dat poeder, draad en straalmiddel niet vochtig kunnen worden. Ook kunnen de materialen in droogkasten worden opgeslagen, waarin de temperatuur op circa 60°C wordt gehouden.

- **Apparatuur voor nabewerking**

  Hiervoor worden onder andere draai- kotter-, freesbanken en slijpapparatuur gebruikt. Aangezien opgespoten lagen dun en hard kunnen zijn, moeten hoge eisen worden gesteld aan de bewerkingsapparatuur en de daarbij behorende gereedschappen. Deze machines moeten bij voorkeur in een aparte ruimte worden opgesteld.

9.2 *Plaatsing van de apparatuur*

Het spuiten vereist uit het oogpunt van geluid en milieu extra aandacht voor het plaatsen van de spuitapparatuur en de voorzieningen aan het gebouw. Door het aanbrengen van geluidsabsorberend materiaal en/of het plaatsen van spuitapparatuur in aparte ruimten kan worden voorkomen dat onnodige hinder voor anderen ontstaat.
Veiligheidsmaatregelen kunnen daaraan tegemoetkomen, maar met het afgeschermd werken is de noodzakelijke discipline voor de persoonlijke bescherming niet minder urgent.
Door het toepassen van mechanisering en automatisering kan minder manafhankelijk worden gewerkt en het inrichten van gesloten spuitplaatsen wordt dan ook meer en meer gebruikelijk.

9.3 *Mechanisering en automatisering*

Bij het thermisch spuiten is vanaf het eerste begin op eenvoudige wijze de produktie gemechaniseerd. Assen, cilinders enz. worden opgespannen in draaibanken en het pistool wordt gemonteerd op het meelopend support.
Voor het manipuleren van niet-rotatie symmetrische werkstukken kunnen draaitafels worden gebruikt, waardoor het produkt gemakkelijk in de meest gewenste positie kan worden opgesteld. In het voorgaande is al gewezen op het gebruik van dergelijke apparatuur.
Een andere zaak die nieuw is, is de automatisering van de produktie. Daar kan een scala van maatregelen onder worden verstaan. In Nederland wordt het thermisch spuiten voornamelijk uitgevoerd door loonspuitbedrijven die in het algemeen een groot aantal wisselende typen van produkten moeten behandelen. De automatisering is gericht op het vergemakkelijken en reproduceerbaar uitvoeren van steeds terugkerende handelingen. De meest ver doorgevoerde automatisering vindt daar plaats waar sprake is van massafabricage of in ieder geval van grote series. Derhalve minder van toepassing voor loonspuitbedrijven.
Echter bestaat automatisering uit een groot aantal te nemen stappen en zelfs kleine bedrijven kunnen hun voordeel daarmee doen. Bij het thermisch spuiten kan de automatisering bestaan uit:

- Het gebruiken van een database of een expertsysteem waarin spuitparameters, die door derden zijn geprogrammeerd, zijn opgeslagen. Deze systemen kunnen door de gebruiker met eigen ervaringsparameters worden aangevuld en gemakkelijk worden opgeroepen voor raadpleging. Dat is een bijzonder zinnige en relatief goedkope manier van automatisering. Het thermisch spuiten is een vak waar veel ervaring bij komt kijken. Door het opslaan van, met succes, gebruikte parameters blijft kennis in een bedrijf behouden. Dergelijke systemen zijn commercieel verkrijgbaar en zijn goed in te zetten in de kleine tot middelgrote onderneming.

- Het automatiseren van de produktie zelf is een tweede fase, die op zichzelf weer in stappen kan worden ingevoerd. Deze fase is geschikt indien sprake is van grotere steeds terugkerende series, bijvoorbeeld revisie van componenten. Te nemen stappen zijn:

  - Door het regelen van het proces met een computer kunnen de procesparameters op een constante waarde worden gehouden en afwijkingen automatisch gecorrigeerd.

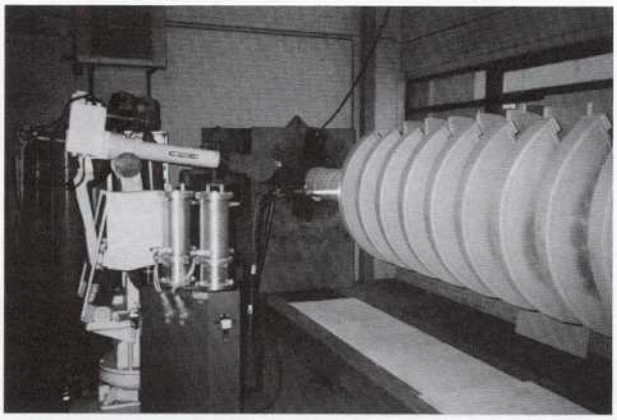
  - Complete spuitprogramma's vanaf voorwarmen tot het opbrengen van de toplaag worden opgeslagen in het geheugen van de computer en kunnen naar believen worden opgeroepen. Elk gespoten produkt heeft zijn eigen 'record' waarin de gebruikte parameters zijn vermeld. De hiervoor genoemde databases kunnen geïntegreerd zijn in de produktie. In figuur 9.1 is een dergelijke installatie weergegeven.

figuur 9.1 Een computergestuurde installatie voor het HVOF-spuiten

  - Het proces wordt geheel door afstandsbediening in een gesloten ruimte uitgevoerd. De operator staat niet meer bloot aan het milieu veroorzaakt door het spuiten.

  - Zowel de procesparameters als de bewegingen van het pistool worden aan elkaar gekoppeld uitgevoerd. Het gebruik van een robotsysteem (figuur 9.2) is daarvoor een mogelijkheid. Ook de beweging van het werkstuk wordt in de meeste gevallen in de besturing geïntegreerd met behulp

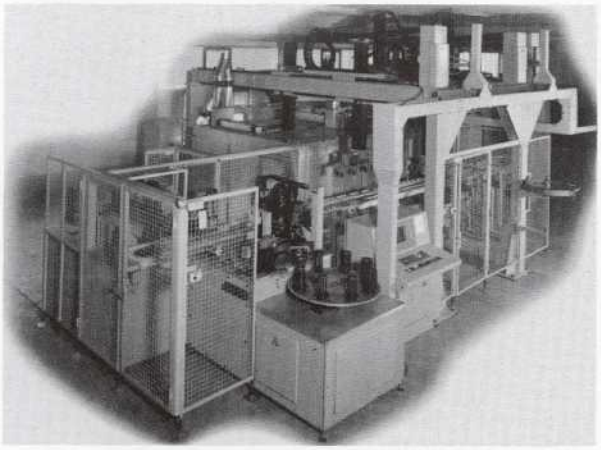
van indexeerbare draaitafels. Alvorens tot deze fase over te gaan moet een heel zorgvuldige analyse van de produktie worden uitgevoerd.



figuur 9.2 Het gerobotiseerd HVOF-spuiten van een peddeldrogeras

Een robot is een dom ding en voert met grote precisie die handelingen uit die hem worden verteld. Vakkennis moet echter door de mens worden ingebracht en bij het thermisch spuiten is sprake van een grote hoeveelheid gevoelige parameters. Een goed voorbeeld hiervan is de grote invloed van de korrelgrootte en de morfologie van het spuitpoeder op de spuitresultaten.

- Tenslotte kan het beladen en ontladen van het manipulatie-apparaat, het stralen, bediening van randapparatuur zoals afzuiging, sluiten deuren, licht, luchtkoeling, en dergelijke in combinatie met het spuiten geheel automatisch worden uitgevoerd. We spreken dan van een automatiseringscel. Een voorbeeld hiervan is een geheel geautomatiseerde installatie voor het spuiten van synchroonringen met molybdeen (figuur 9.3).



figuur 9.3 Automatische installatie voor het spuiten van synchroonringen met molybdeen

Welk deel van de produktie ook wordt geautomatiseerd, altijd dient men een kritische analyse hiervan te maken. De eisen die men aan de automatisering stelt en de te verwachten resultaten moeten in detail in een specificatie worden vastgelegd.
Indien een installatie wordt aangeschaft die uit meerdere zelfstandige componenten bestaat, is het noodzakelijk dat één hoofdaannemer verantwoordelijk is voor levering van de complete apparatuur. Het zelf samenstellen van een installatie uit zelfstandige delen leidt in de meeste gevallen tot moeilijke discussies wanneer de apparatuur niet naar behoren werkt. Zeker bij de automatisering is het koppelen van niet bij elkaar behorende apparatuur een bron van zorg.
Voordat tot de beslissing voor aanschaf wordt overgegaan, moet door de leverancier proeven worden uitgevoerd, waardoor wordt aangetoond dat de beoogde doelstellingen zullen worden gehaald.
De oplevering van de apparatuur kan het beste in twee fasen plaatsvinden. De eerste bij het leverende bedrijf en de finale aflevering bij de opdrachtgever. In beide fasen dient de afname volgens een, vooraf met de leverancier overeengekomen, protocol te worden uitgevoerd.

Hoofdstuk 10

Gezondheid en veiligheid

10.1 Inleiding

Veilig werken hoort bij de primaire verantwoordelijkheden van zowel werknemer als werkgever. Het respecteren van veilige arbeidsomstandigheden en het opvolgen van de bijbehorende voorschriften kan worden beschouwd als een weerspiegeling van de technische en ethische standaarden van het bedrijfsleven. Vanzelfsprekend is door de wetgever structuur aangebracht in deze ingewikkelde materie.
De bescherming van de opspuitoperator dient in feite te beginnen voor het eigenlijke opspuitwerk begint. Anders gezegd: het bedrijf dient op de hoogte te zijn van de gevaren voor de mens tijdens het opspuiten en dient daarvoor maatregelen te treffen en beschermende hulpmiddelen beschikbaar te hebben. Men dient op de hoogte te zijn van de door de overheid opgestelde voorschriften voor het verantwoord werken bij het lassen en aanverwante processen.
Vaak is het zo, dat economische motieven de veiligheidsmaatregelen ondergeschikt maken (korte levertijd, spoedklussen, enz.). Men dient echter te bedenken dat de ervaren opspuitoperator die gezond blijft, een veel grotere economische waarde heeft dan welke aankomende, of minder gezonde opspuitoperator dan ook.
De wetgeving schrijft vier niveaus voor (zie schema figuur 10.1): bronbestrijding, industriële ventilatie, afscherming mens en persoonlijke bescherming. In de rest van dit hoofdstuk worden deze punten nader toegelicht.

10.2 De Arbo-wet

De arbeidsomstandighedenwet - kortweg Arbo-wet genoemd - is bedoeld als een stuk gereedschap waarmee werkomstandigheden kunnen worden verbeterd. Daarbij gaat het om veiligheid, gezondheid en welzijn op het werk, aldus een citaat uit een brochure met Arbo-wettekst en toelichting, gezamenlijk uitgegeven door het Ministerie van Binnenlandse Zaken en het Ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid.
De Arbo-wet vormt de algemene basis voor het veilig werken in het bedrijfsleven. De wet zegt dat de werkgever verantwoordelijk is voor het ter beschikking stellen van veiligheidsvoorzieningen en toezicht moet uitoefenen op het gebruik ervan. Wanneer de werknemer in gebreke blijft de middelen te gebruiken en vloeit hier schade of letsel uit voort, dan kan hij daar voor zelf aansprakelijk voor worden gesteld.

10.3 Industriële ventilatie

Zowel bij de autogene als bij de elektrische processen kunnen explosieve metaaldampen of wolken van metaalstof ontstaan. Tevens reageren sommige fijne metaaldeeltjes, zoals aluminium, spontaan met water onder de vorming van waterstofgas. Het gevaar van explosies is reëel aanwezig indien onvoldoende wordt geventileerd. De stofafzuiginstallatie dient hierop te zijn ontworpen.

* Plaatselijke afzuiging dient damp van het opspuiten op te vangen, voordat de operator het kan inademen.
  Plaatselijke afzuiging moet altijd!
* Ruimteventilatie is nodig om concentratie-opbouw te voorkomen.
  Ruimteventilatie is altijd aan te bevelen; slechts wanneer in grote hallen incidenteel wordt gespoten kan ruimteventilatie in verband met het opspuiten overbodig zijn. Ruimteventilatie zal weinig invloed hebben op de lasrookconcentratie in de ademzone. Voor de omstanders is het wel van belang.
* Onder bepaalde voorwaarden kan afgezogen, gefilterde lucht worden gerecirculeerd.

De milieu-eisen ten aanzien van de af te zuigen dampen worden steeds strenger. Het reeds in vele gevallen te gebruiken spuitmateriaal in poedervorm en de samenstelling hiervan maken dat hoge eisen aan een filtersysteem moeten worden gesteld. Voor meer informatie zie ook paragraaf 10.5.1.

10.4 Bescherming van de omgeving

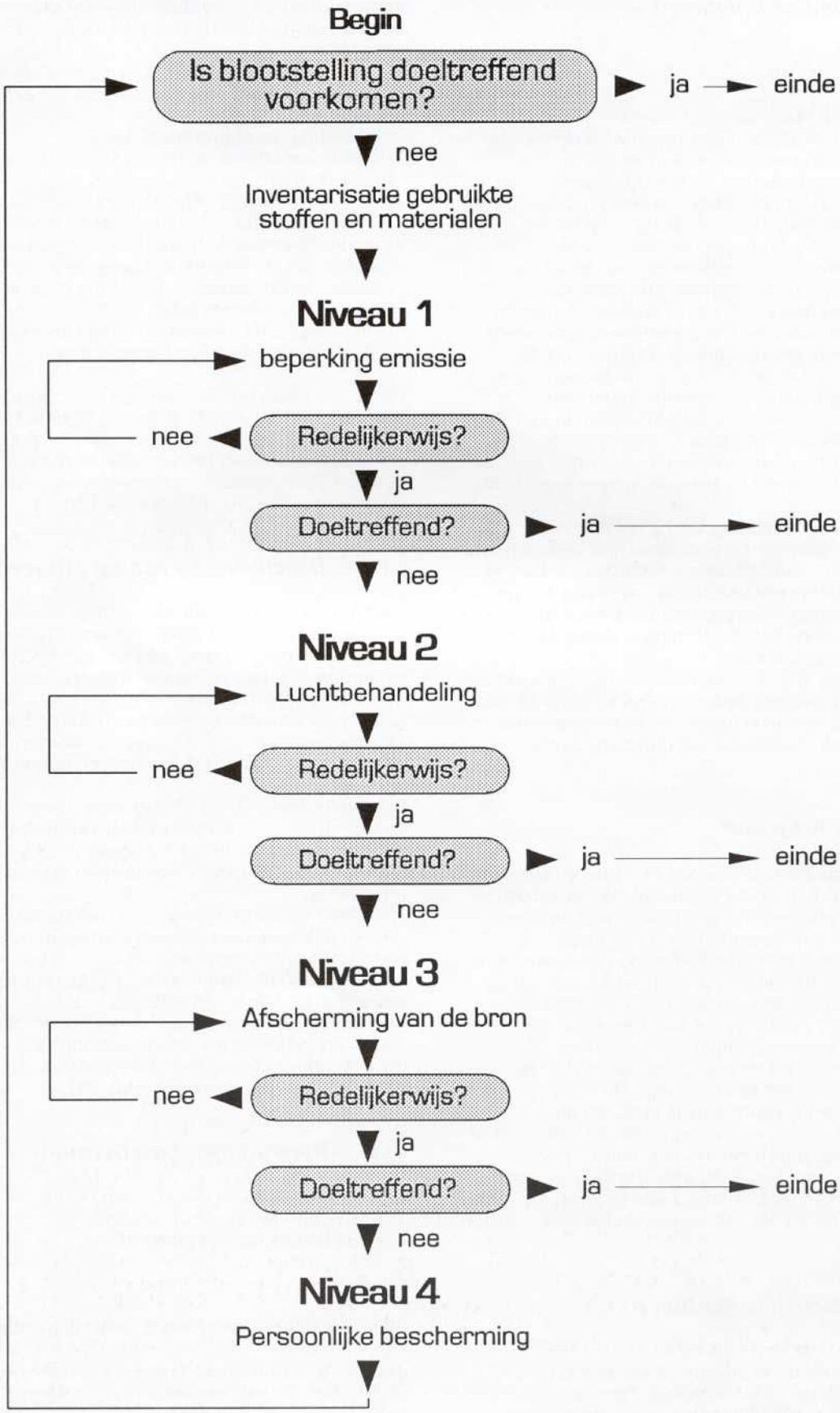
Verbonden aan het gebruik van thermische spuitapparatuur is de omgang met geconcentreerde energiestromen, uit gasflessen, gasdistributie-systemen of uit elektrische krachtstroomnetten.
Bij de autogene processen worden explosieve gassen als acetyleen, propaan en waterstof gebruikt als energieleverancier. Bovendien worden zuurstof en stikstof (als hulpgas) aan flessen onder hoge druk onttrokken.
Opslag en omgang met hoog gecomprimeerde energiedragers en hun containers vereisen strenge voorzorgsmaatregelen. De publikatiebladen van de Arbeidsinspectie geven hieromtrent de nodige informatie.
Hier dient te worden benadrukt dat brandbare gassen in bepaalde mengverhoudingen met lucht (of zuurstof) explosieve mengsels kunnen vormen. Tevens kan vlamterugslag in de apparatuur optreden. Er dienen vlamdovers in de gasaanvoerleidingen te zijn aangebracht. Slangen en slangverbindingen dienen regelmatig te worden gecontroleerd op lekkage. Voor flessenbatterijen gelden extra voorzorgsmaatregelen.

10.5 Persoonlijke bescherming

Dit betreft in feite de bescherming van:
1. ademhalingswegen; afzuiging
2. huid, handschoenen; overall
3. ogen; brillen
4. gehoor; oorkappen, oorproppen

Bij alle spuitprocessen wordt gebruik gemaakt van een vlam of een boog. Hiermee gepaard gaat het gevaar van brand of verbranding van bijvoorbeeld de handen aan opgewarmde werkstukken. Tevens is het niet te vermijden dat hoog opgewarmde

Verloop van de beheersstrategie



figuur 10.1 Schema voor het nemen van beschermende maatregelen

spuitdeeltjes doelen treffen naast het te bedekken voorwerp. Ook dit kan brandgevaar opleveren. Het spreekt vanzelf dat de spuitoperator tegen rondvliegende spuitdeeltjes afgeschermd moet zijn met brandwerende kleding. Opgemerkt zij dat brandend metaalstof niet met water geblust mag worden in verband met het potentiële gevaar van waterstofontwikkeling.

10.5.1 *Dampen*

Lucht, die bezwangerd is met dampen of stof, is gevaarlijk voor de mens. Vreemde stofconcentraties dienen voor ademingslucht aan strenge banden te worden gelegd.
Voorwerpen die reeds in bedrijf zijn geweest, kunnen stoffen bevatten in poriën, boringen of verborgen holten die gedurende het opwarmen tot de insmelttemperatuur explosief vrijkomen of in giftige dampen overgaan. Een grondige inspectie en reiniging van het te behandelen voorwerp met het oog op de genoemde potentiële gevaren is absoluut noodzakelijk, alvorens aan een insmeltbehandeling te beginnen.
De in deze paragraaf beschreven MAC-lijst moet worden gerespecteerd. Een goede ruimteventilatie en afzuiging van damp en stof is ook nu weer geboden naast het dragen van ademhalingsmaskers. De nationale MAC-lijst geeft een uitvoerige toelichting omtrent de totstandkoming en het hanteren van de MAC-waarden. Zij omvat tevens een alfabetische lijst van stoffen waarvoor MAC-waarden zijn vastgesteld. Om deze lijst eenduidig te kunnen lezen, worden de MAC-waarden in hun betekenis nader toegelicht.
De MAC-C waarde is een afkorting van Maximale Aanvaarde Concentratie Ceiling waaronder wordt verstaan een concentratie waarvan overschrijding in alle gevallen moet worden voorkomen. Een dergelijke aanduiding wordt toegepast bij die stoffen waarvan de MAC-waarden (mede) zijn gebaseerd op een snel optredend toxisch verschijnsel.
Relevanter voor de arbeidsplek in relatie tot thermisch spuiten is de MAC-TGG waarde, een afkorting die staat voor Maximale Aanvaarde Concentratie Tijd Gewogen Gemiddelde. Hieronder verstaat men de over de tijd gemiddelde maximale aanvaarde concentratie bij een blootstellingsduur tot 8 uur per dag en niet meer dan 40 uur per week.
Enkele voorbeelden uit de alfabetische lijst van stoffen die voor kunnen komen bij het thermisch spuiten met een MAC-waarde zijn weergegeven in tabel 10.1. Voorwaarden voor een goede afzuiging waaraan moet worden voldaan, zijn vastgelegd in de Nederlandse Emissie Richtlijnen (NER).

Dampen van reinigingsmiddelen

Gewezen moet worden op het gevaar van het gebruik van gechloreerde koolwaterstoffen, zoals "per" en "tri" bij het reinigen voor het opspuiten. Door de ultra-violette straling worden de dampen ontleed en ontstaat er het giftige fosgeengas. Dit soort reinigingsmiddelen mag dan ook niet aanwezig zijn in de werkplaats.
De overige ontvettingsmiddelen zijn alle sterk brandgevaarlijk; het reinigen voor het opspuiten moet dan ook in een andere ruimte plaatsvinden dan die waarin wordt gespoten.

10.5.2 *Straling, oogbescherming*

Het plasmaspuiten heeft een zeer hoog stralingsniveau met voornamelijk ultraviolet licht. De U.V. straling verbrandt levend weefsel dat erdoor getroffen wordt.
Lichaamsdelen, speciaal de ogen, dienen tegen de intense U.V. straling van het plasma, maar eveneens van reflecterende wanden, te worden afgeschermd. Een (voorzet)bril met donkere glazen biedt voldoende bescherming. Het is aan te bevelen om alle overige lichaamsdelen te bedekken met U.V.-licht werende kleding. Leer, bijvoorbeeld, biedt een goede bescherming.

10.5.3 *Geluid, gehoorbescherming*

Het autogene draadspuiten, het autogene hoge snelheidsspuiten en het plasmaspuiten gaan gepaard met een hoge tot zeer hoge geluidsproduktie. Metingen aan een plasmatoorts die met een middelmatig vermogen van 40 kW bedreven werd, hebben aangetoond dat er binnen een straal van 60 centimeter rondom de toorts, geluidssterkten van 120 dB(A) en meer kunnen optreden. Zulke geluidsniveaus leiden bij een onbeschermd oor vrijwel onmiddellijk tot onherstelbare gehoorbeschadiging.
Bij het hanteren van deze spuiten moet dan ook afdoende gehoorbescherming worden gedragen. De alom bekende oorpropjes zijn absoluut onvoldoende. Het geluid moet bij een 8-urige werkdag teruggebracht worden tot onder de grens van 80 dB(A). Speciaal geconstrueerde helmen kunnen hier de oplossing vormen.
In industriële produktiesituaties, waarbij robots of andere automaten de spuit hanteren, verdient het de voorkeur de geluidsbron (bijvoorbeeld de plasmatoorts) te laten werken in een geluidsisolerende ruimte.

10.5.4 *Hoge temperaturen*

Het insmelten van opgespoten lagen gaat gepaard met een relatief hoge temperatuur. Afhankelijk van het coatingmateriaal wordt hierbij het werkstuk verhit tot 1050 of 1150 graden Celcius. De spuitoperator dient bij het insmelten derhalve warmtereflecterende en -isolerende kleding te dragen. Het werkstuk zelf moet op een zodanige wijze worden ondersteund, dat de ondersteuning niet kan bezwijken als gevolg van verweking van het materiaal. Onderdelen die tengevolge van de hoge temperatuur kunnen scheuren of ontploffen mogen niet aan een insmeltbehandeling worden onderworpen. Een voorbeeld van een dergelijke constructie vormt een gietijzeren, holle, afgesloten cilinder, waarbinnen zich door verhitting op insmelttemperatuur een hoge druk van de aanwezige gassen kan ontwikkelen.

10.5.5 *Bescherming tegen elektriciteit*

Bij de thermische spuitprocessen die elektrische energie gebruiken, komen hoge elektrische stromen en spanningen voor. De operator, in direct contact met de apparatuur, dient isolerende handschoenen te dragen ter bescherming tegen elektrische inwerking.

tabel 10.1 MAC-waarden van enkele stoffen

Naam van de stof	CAS nummer	MAC - TGG	
		ppm	mg/m³
Aluminium	7429-90-5	-	10
Aluminiumoxide		-	10
Antimoon en -verbindingen	7440-36-0	-	0,5 als Sb
Beryllium	7440-41-7	-	0,002
Boriumoxide	1303-86-2	-	10
Cadmium en -verbindingen	7440-43-9	-	0,02 als Cd
Cadmiumoxide	1306-19-0	-	0,05 als Cd
Calciumoxide	1305-78-8	2	5
Chroom en in water oplosbare zouten	7440-47-3	-	0,5 als Cr
Hafnium	7440-58-6	-	0,5
Indium en -verbindingen	7440-74-6	-	0,1
Kobalt (rook)	7440-48-4	-	0,1
Koolmonoxide	630-08-0	25	29
Koper (rook)	7440-50-8	-	0,2
Koper (stof)	7440-50-8	-	1
Lood	7439-92-1	-	0, 5
Magnesiumoxide (rook)	1309-48-4	-	10 als Mg
Molybdeen (in water oplosbare verbinding)	7439-98-7	-	5 als Mo
Molybdeen (in water onoplosbare verbinding)	7439-98-7	-	10 als Mo
Nikkel	7440-02-0	-	1
Nikkel (in water oplosbare verbinding)	7440-02-0	-	0,1
Ozon	10028-15-6	0,1	0,2
Silicium	7440-21-3	-	10
Siliciumcarbide	409-21-2	-	10
Stikstofdioxide	10102-44-0	2	4
Tantaal	7440-25-7	-	5
Tin	7440-31-5	-	2
Tinoxide	18282-10-5	-	2
Titaandioxide	13463-67-7	-	10
Wolfraam en -verbindingen	7440-33-7		
- in water oplosbaar		-	1
- niet in water oplosbaar			5
IJzeroxide	1309-37-1	-	5
Yttrium	7440-65-5	-	1
Zilver en in water oplosbare verbinding	7440-22-4	-	0,01 als Ag
Zinkoxide	1314-13-2	-	5
Zirkonium en -verbindingen	7440-67-7	-	5

De apparatuur moet jaarlijks worden geïnspecteerd op de deugdelijkheid van de aansluitingen op de stroombron.

10.6 *Opslag en gebruik van gassen*

Gascilinders, behalve die voor acetyleen, staan onder een druk van circa 200 bar en rouleren regelmatig tussen de bedrijven en de gasleverancier. Deze laatste zal een regelmatige controle uitvoeren van de afsluiter en van de fles zelf. Een gascilinder moet goed vast staan.
De cilinders moeten niet bij open vuur, naast centrale verwarming of in de felle zon worden geplaatst. Zelf moeten geen reparaties aan een defecte afsluiter van een cilinder worden verricht. Deze moet aan de leverancier worden teruggestuurd. Voor het transporteren moet een flessenwagen worden gebruikt, waarop de cilinders goed vastgezet kunnen worden vervoerd.
De Arbeidsinspectie heeft voorschriften waaraan de opslag en het gebruik van gascilinders moet voldoen. Dit zijn:

- Code P 7: Aanwijzingen voor opslag, vervoer, opstelling en gebruik van acetyleenflessen;
- Code P14: Aanwijzingen voor het inrichten, het opstellen en het gebruik van een batterij acetyleenflessen en zuurstofflessen;
- Code P46: Propaan; gebruik uit flessen.

Tot slot kan nog worden gewezen op een serie van voorlichtingsbladen die onder verantwoordelijkheid van de DVS (Deutscher Verband für Schweisstechnik) gevestigd te Düsseldorf, zijn uitgebracht en die rechtstreeks betrekking hebben op de veiligheid bij het thermische spuiten.
In Merkblatt DVS 2307 zijn de volgende delen verschenen:

- deel 1: Arbeitsschutz beim Entfetten und Strahlen von Oberflächen zum thermischen Spritzen;
- deel 2: Arbeitsschutz beim Flammspritzen;
- deel 3: Arbeitsschutz beim Lichtbogenspritzen;
- deel 4: Arbeitsschutz beim Plasmaspritzen.

Literatuur

Hoofdstuk 1 Thermische spuitprocessen

- T.G. Kraak. Overzicht van thermische spuitprocessen. Materialen, december 1990, nr. 10, p. 2-8.
- R.W. Smith. Plasma spray processing...The state of the art... and future - From a surface to a materials processing technology. Proceedings 2nd Plasma-Technik-Symposium, volume 1, Luzern, Zwitserland, 5-7 juni 1991, p. 17-36.
- H. Schmidt, D. Matthäus. Stage of development of the arc metal spraying systems, new experiences and data. Proceedings ITSC 1980, 9th International Thermal Spraying Conference, Den Haag 19-23 mei 1980, session VII, paper 42, p. 225-231.
- H. Kreye, P. Heinrich. Stand der Entwicklung und Perspectiven des Hochgeschwindigkeits-Flammspritzens. Schweissen und Schneiden, 42 Jahrgang, 1990, nr. 8, p. 382-385.
- H. Kreye. High velocity flame spraying-process and coating characteristics. Proceedings 2nd Plasma-Technik-Symposium, volume 1, Luzern, Zwitserland, 5-7 juni 1991, p. 39-47.

Hoofdstuk 2 Opspuitmaterialen

- J. Beszkowiak. Characterization and selection of powders for thermal spraying. Proceedings 2nd Plasma-Technik-Symposium, volume 2, Luzern, Zwitserland, 5-7 juni 1991, p. 323-329.
- E. Lugscheider, M. Loch. Coated powders - The status today. Proceedings 2nd Plasma-Technik-Symposium, volume 2, Luzern, Zwitserland, 5-7 juni 1991, p. 339-351.
- M. Kleykamp. Het gebruik van poeders voor het vlamspuiten. Metaal en Techniek, augustus 1990, p. 14-17.
- K. Smolka, R. Lippe. Thermisch Spritzen von selbstfließenden pulverförmigen Legierungen. Schweissen und Schneiden, 42 Jahrgang, 1990, nr. 8, p. 400-402.
- J. Beszkowiak, G. Schwier, H. Burkard. Pulverförmige Zusätze für das thermische Spritzen. Schweissen und Schneiden, 42 Jahrgang, 1990, nr. 8, p. 394-397.
- H. Meinhardt, B. Meyer, J. Müller. Verdüste Pulver zur Herstellung von Oberflächenschichten durch thermisches Spritzen. Thermisch Spritzkonferenz TS 90, DVS Bericht nr. 130, Essen, 29-31 augustus 1990, p. 172-177.

Hoofdstuk 3 Hechtingsmechanismen bij het opspuiten

- J.M. Houben. Relation of the adhesion of plasma sprayed coatings to the process parameters size, velocity and heat content of the spray particles. Dissertatie 1988, TU-Eindhoven.

Hoofdstuk 4 Keuzecriteria thermische spuitprocessen

- B. Lefeber. Oppervlaktebehandelingen en deklagen: Een functionele benadering. Rapport FDO Technische Service B.V., Amsterdam, rapportnr. MSA 89-077, 1 mei 1989.
- T. Oka, H. Nakahira, T. Noritoh. Basic characteristics of different abradable coatings. DVS-Thermisch Spritzkonferenz TS 90, Essen, 29-31 augustus 1990, p. 59-67.
- K. Smolka. Thermisch Spritzen - Ein Leitfaden für den Praktiker. Deutscher Verlag für Schweißtechnik (DVS) GmbH, Düsseldorf 1985, Band 15, hoofdstuk 5.
- Thermal spraying: Practice, theory and application. American Welding Society, Miami, Florida, USA, 1985, Chapter 10 Economics, p.130-146.
- W.H.R. Ott. Lichtbogenspritzgeräte und -anlagen - verfahrens- und betriebstechnische Neuerungen. DVS-Thermische Spritztechnik 1977, Essen, Deutscher Verlag für Schweißtechnik (DVS) GmbH, Düsseldorf, p. 25-31.

Hoofdstuk 5 Voorbehandeling

- A. Hibler, K. Gerber. Vor- und Nachbehandlung. Thermisch Spritzkonferenz TS 90, Essen, 29-31 augustus 1990, DVS Bericht nr. 130, p. 32-34.
- K. Smolka. Thermisch Spritzen - Ein Leitfaden für den Praktiker. Deutscher Verlag für Schweißtechnik (DVS) GmbH, Düsseldorf 1985, Band 15, hoofdstuk 2.
- D. Kniewald, M. Sefara, K. Takác. Contributions to the problems of preliminary treatment of surfaces by means of blasting and its influence on the properties of metal spraying coatings. International Thermal Spraying Confence 1976, Miami, Florida, USA, p. 482-491.

Hoofdstuk 6 Nabehandeling

- K. Smolka. Thermisch Spritzen - Ein Leitfaden für den Praktiker. Deutscher Verlag für Schweißtechnik (DVS) GmbH, Düsseldorf 1985, Band 15, hoofdstuk 3 en 7.
- J. Stocker. Wege zum automatisierten programmierbaren Einschmelzen von selbstfließenden Pulvern. DVS Thermisch Spritzkonferenz TS 90, Essen, 29-31 augustus 1990, p. 112-115.

Hoofdstuk 8 Afnamecontrole van opgespoten lagen

- R. Frielinghaus, G. Schmidt, U. Wielpütz. Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes der Ultraschalltechnik zur Prüfung thermisch gespritzer Schichten. DVS-Thermisch Spritzkonferenz TS 90, Essen, 29-31 augustus 1990, p. 147-150.
- A.R. Nicoll, H. Eschnauer. Quality assurance of plasma-spray powders. Proceedings of the 11th International Thermal Spraying Conference 'Advances in Thermal Spraying', Montreal, Canada, 8-12 september 1986, p. 289-297.
- K.H. Busse, R. Klaas. Praxisorientierte Qualitätssicherung von thermisch gespritzten Schichten. Thermisch Spritzkonferenz TS 90, DVS Bericht nr. 130, Essen, 29-31 augustus 1990, p. 143-146.

Hoofdstuk 9 Inrichting van de werkplaats en automatisering

- K. Smolka. Thermisch Spritzen - Ein Leitfaden für den Praktiker. Deutscher Verlag für Schweißtechnik (DVS) GmbH, Düsseldorf 1985, Band 15, hoofdstuk 9.
- P.C. Wolf. Mechanization and automation in the field of thermal spraying. 10th International Thermal Spraying Conference1983, Essen, Bericht nr. 80, p. 95-99.
- K.D. Borbeck. Robotics and manipulators for automated plasma spraying and vacuum plasma spraying. 10th International Thermal Spraying Conference 1983, Essen, DVS Bericht nr. 80, p. 99-104.
- H. Kern, M. Fathi-Torbaghan, M. Stracke. Einsatz von Expertensystemen zur Beratung und Informationen im Bereich des thermischen Spritzens. Thermisch Spritzkonferenz TS 90, DVS Bericht nr. 130, Essen, 29-31 augustus 1990, p. 247-250.
- K. Ebert, W. Kanehl, H. Krings, B. Lüke, C. Verpoort. Auf dem Weg zur Entwicklung von CIM-Konzepten in der thermischen Beschichtungstechnik. Schweissen und Schneiden, 42 Jahrgang, 1990, nr.8, p. 386-393.

Hoofdstuk 10 Gezondheid en veiligheid

- M. Oechsele, B. Sutor, U. Szieslo. Über den Einfluß der Pulvermorphologie auf die Schadstoffemission beim Metallpulverflammspritzen. Thermisch Spritzkonferenz TS 90, DVS Bericht nr. 130, Essen, 29-31 augustus 1990, p. 126-128.
- K. Kreisel. Absaugen und Filtern von Stäuben beim thermischen Spritzen aus der Sicht des Anwenders. Thermisch Spritzkonferenz TS 90, DVS Bericht nr. 130, Essen, 29-31 augustus 1990, p. 129-132.
- H. Bersenkowitsch. Emissionsminderung an thermischen Spritzanlagen: Einhalten der Emissionsgrenzwerte für krebserzeugende Stoffe gemäß TA Luft 86. Thermisch Spritzkonferenz TS 90, DVS Bericht nr. 130, Essen, 29-31 augustus 1990, p. 133-138

colofon

figuur 1.5	Metco B.V.
figuur 1.6	Metco B.V.
figuur 1.8	Metco B.V.
figuur 1.10	Metco B.V.
figuur 1.11	Metco B.V.
figuur 1.14	Metco B.V.
figuur 1.19	Metco B.V.
figuur 2.2	Hermann C. Stark Berlin
figuur 2.3	Hermann C. Stark Berlin
figuur 2.4	Hermann C. Stark Berlin
figuur 2.5	Hermann C. Stark Berlin
figuur 2.6	Hermann C. Stark Berlin
figuur 2.7	Hermann C. Stark Berlin
figuur 2.8	Hermann C. Stark Berlin
figuur 2.10	Metco B.V.
figuur 2.11	Metco B.V.
figuur 3.3	TU-Eindhoven
figuur 3.4	TU-Eindhoven
figuur 7.1	Michaël Holland Chroom B.V.
figuur 7.2	Michaël Holland Chroom B.V.
figuur 7.3	Michaël Holland Chroom B.V.
figuur 7.4	Michaël Holland Chroom B.V.
figuur 7.5	Michaël Holland Chroom B.V.
figuur 7.6	Michaël Holland Chroom B.V.
figuur 7.7	Michaël Holland Chroom B.V.
figuur 7.8	Michaël Holland Chroom B.V.
figuur 7.9	Michaël Holland Chroom B.V.
figuur 7.10	Michaël Holland Chroom B.V.
figuur 7.11	Metco B.V.
figuur 7.12	Metco B.V.
figuur 7.13	Metco B.V.
figuur 7.14	Michaël Holland Chroom B.V.
figuur 7.15	Revamo B.V.
figuur 7.16	Metco B.V.
figuur 7.17	Metco B.V.
figuur 7.18	Metco B.V.
figuur 7.19	Metco B.V.
figuur 7.20	Metco B.V.
figuur 7.21	Metco B.V.
figuur 7.22	Metco B.V.
figuur 7.23	Metco B.V.
figuur 7.24	Michaël Holland Chroom B.V.
figuur 7.25	Michaël Holland Chroom B.V.
figuur 7.26	Michaël Holland Chroom B.V.
figuur 7.27	Michaël Holland Chroom B.V.
figuur 7.28	Michaël Holland Chroom B.V.
figuur 7.29	Revamo B.V.
figuur 7.30	Metco B.V.
figuur 7.31	Revamo B.V.
figuur 7.32	Tafa
figuur 7.33	Tafa
figuur 7.34	Tafa
figuur 7.35	Metco B.V.
figuur 7.38	Revamo B.V.
figuur 7.39	Revamo B.V.
figuur 7.40	KLM
figuur 7.41	Revamo B.V.
figuur 7.42	Revamo B.V.
figuur 7.43	Revamo B.V.
figuur 7.44	Revamo B.V.
figuur 7.45	Revamo B.V.
figuur 7.46	Revamo B.V.
figuur 9.1	Metco B.V.
figuur 9.2	Metco B.V.
figuur 9.3	Metco B.V.

metaalunie
nederlandse organisatie van ondernemers in het midden- en kleinbedrijf in de metaal

Einsteinbaan 1,
Postbus 2600, 3430 GA NIEUWEGEIN
telefoon (03402) 53344
telefax (03402) 53122

FME

Vereniging FME
vereniging van ondernemingen in de metaal-, elektronika- en elektrotechnische industrie en aanverwante sectoren

Boerhaavelaan 40,
Postbus 190, 2700 AD ZOETERMEER
telefoon (079) 531100
telefax (079) 531365