

Thermisch spuiten : een techniek met perspectief

Citation for published version (APA):

Houben, J. M. (1980). Thermisch spuiten : een techniek met perspectief. *Polytechnisch tijdschrift. Werktuigbouw*, 35(4), 227-237.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1980

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

THERMISCH SPUITEN, EEN TECHNIEK MET PERSPECTIEF



ir. J.M. Houben

TH-Eindhoven
afdeling der Werktuigbouw

Met behulp van thermisch spuiten kan men oppervlaktelagen op onderdelen aanbrengen die een effectieve weerstand hebben tegen corrosie en slijtage. Tevens biedt deze techniek uitstekende mogelijkheden voor het aanbrengen van isolerende en geleidende oppervlaktelagen en voor de vormgeving van hittevaste produkten. In dit artikel behandelt de auteur de karakteristieke kenmerken van thermisch spuiten en geeft een overzicht van het onderzoek zoals aan de TH-Eindhoven naar deze techniek wordt verricht.

begripsbepaling

Onder thermisch spuiten wordt verstaan een verzameling van methoden voor het aanbrengen van een oppervlaktelaag op een machinedeel of constructie. Bij deze methoden wordt door middel van een vlam het te verspuiten materiaal verhit tot een temperatuur van om en nabij het smeltpunt. Tevens wordt het coatingmateriaal door het relatief snelstromende gas van de vlam versneld, soms tot een snelheid van enkele honderden meters per seconde. De materiaalstroom, bestaande uit discrete kleine deeltjes, is daardoor in staat de afstand tussen het spuitpistool en het substraat te overbruggen in elke spuitpositie (fig. 1). Alvorens nader in te gaan op de details van de verschillende spuitprocessen, lijkt het zinnig aan te duiden waarom thermisch spuiten toegepast wordt en welke plaats deze techniek inneemt onder de overige oppervlaktebehandelingsmethoden.

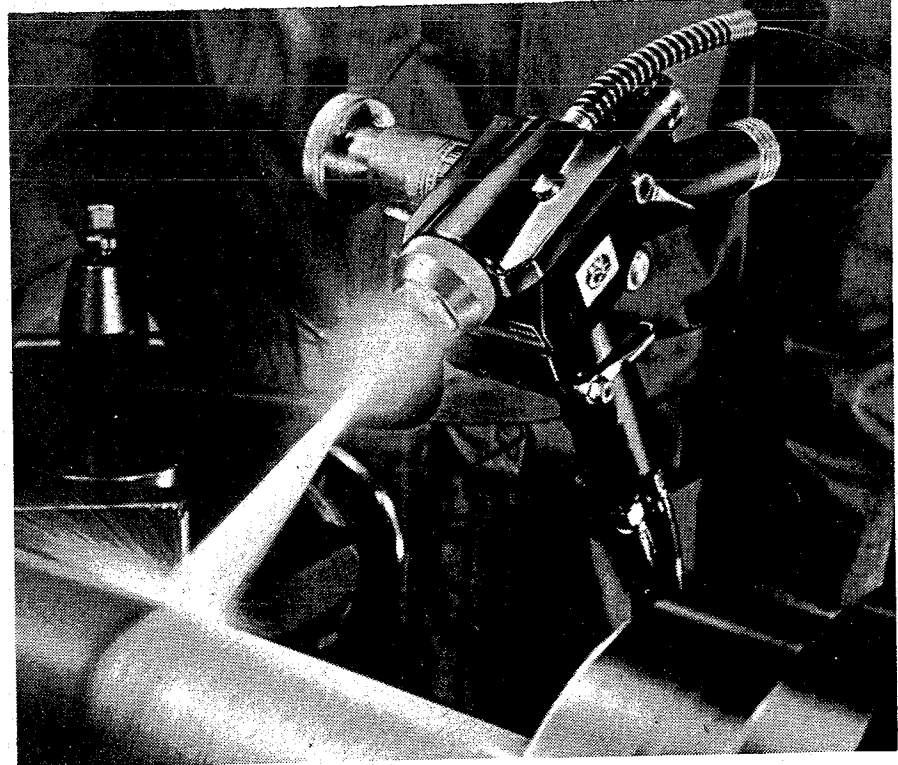
het doel van oppervlaktelagen, respectievelijk thermisch spuiten

Een doorbrekend besef van materiaalschaarste en een vertraagde economische ontwikkeling dragen ertoe bij, dat in de huidige industriële ontwerpen in toenemende mate gestreefd wordt naar een minimum aan materiaalverbruik, een zo zuinig mo-

gelijk bedrijf en optimale onderhouds-, respectievelijk reparatiemogelijkheden van de ontworpen constructie. Het materiaalverbruik kan beperkt worden door het opvoeren van krachtdichtheden en snelheden van gas- of vloeistofstromen. Door het toepassen van hogere bedrijfstemperaturen kunnen thermische rendementen worden verbe-

terd. Daarmee daalt het specifieke energieverbruik van het ontwerp bij gelijkblijvende prestatie. Rendementsverbetering mag derhalve gezien worden als een tweesnijdend zwaard; zowel het energieverbruik als de bedrijfskosten worden gunstig beïnvloed. Het streven naar economisch bedrijf komt ook tot uiting in het gebruik van goedkope brandstoffen. Scheepsdiesels lopen op zwavel- en vanadiumhoudende olie met een sterk corrosief karakter. Deze olie is in vergelijking met schone brandstof

1. Algemeen beeld van een thermisch spuitproces.



ast,
reel
en,
oor
het
ch-

ken
or-
de
het
aas
lla-
ty-
vel

op-
to-
ria
de
de

jo-
je-
er-
in-
op

m

er
3
12

te
e-
si-
n-
in
n-
e
g-
n
i-
r-
st
st
e
r
g
i-
-
il
-
z

goedkoop, maar vereist extra aandacht bij het ontwerp met betrekking tot de corrosievastheid van de gebruikte materialen. De prijs van een machinedeel wordt onder andere bepaald door de kosten van het materiaal en de kosten van de vervaardiging. Een complex machinedeel zal duur zijn door zijn produktiekosten, terwijl bij hoogbelaste constructies het materiaal zelf van doorslaggevende betekenis is in de prijsbepaling. Een sprekend voorbeeld waarin beide kostenfactoren duidelijk aanwezig zijn, vormen sommige gasturbineschoepen die in prijs per stuk overeenkomen met een goede middenklasse automobiel. Het is duidelijk, dat men hier zal streven naar reparatiemogelijkheden indien zo'n onderdeel beschadigd of versleten is.

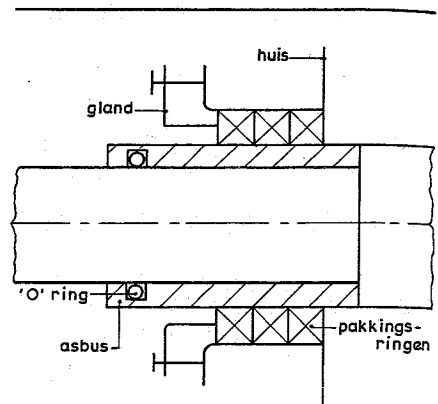
Het toepassen van hoogbelaste machinedelen leidt onvermijdelijk tot verhoogde slijtage en corrosie. Slijtage of corrosie van een machinedeel zijn oppervlakteprocessen die uiteindelijk leiden tot een eindige levensduur door functieverlies of breuk. De levensduur kan in dergelijke gevallen gunstig beïnvloed worden door het

2. Vloeistofpomp
 - a. afdichting van pompas
 - b. lagers
 - c. pompwaaier
 - d. pomphuis

oppervlak van het machinedeel eigenschappen te geven die speciaal bedoeld zijn om slijtage en corrosie tegen te gaan. Aan de hand van een alledaags voorbeeld kan dit nader worden toegelicht.

Figuur 2 toont een doorsnede van een vloeistofpomp. Ter plaatse van de afdichtingsringen is er wrijvend contact met de as. Hier zal slijtage optreden. Vaste stofdeeltjes zullen in het relatief zachte materiaal van de pakking worden ingebed. Zij fungeren als beitelstjes die de as langzaam maar zeker doorploegen en verspanen. Dit verschijnsel draagt de naam abrasie.

Een ander slijtageverschijnsel, erosie, zal optreden aan de pompwaaier. Deze draait in een vloeistof die vaste deeltjes kan bevatten, bijvoorbeeld zand bij een vuilwaterpomp. Door de relatieve snelheid tussen de vloeistof met vaste deeltjes en de waaier zullen de schoepen eveneens een soort verspaningsproces ondergaan, waardoor ze sterk gereduceerd worden in dikte. Voordat de schoepen volledig weggeërodeerd zijn, is er meestal sprake van een zodanig functieverlies door vormveranderingen, dat de waaier vervangen zal worden, omdat de pomp onvoldoende vloeistof of druk levert. Door het gecombineerd optreden van corrosie en erosie zullen het pomphuis en de waaier evenals de as een voor-

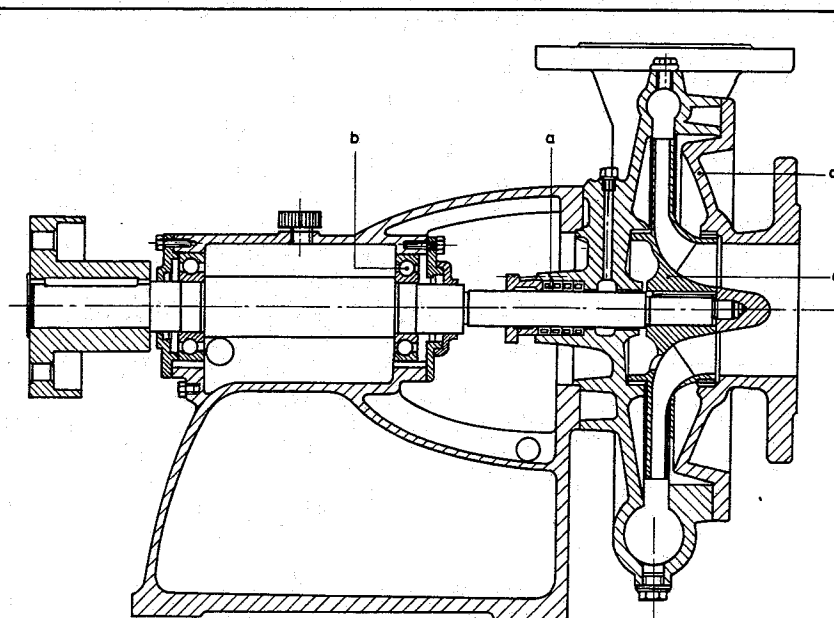


3. Afdichtingsconstructie met slijtvaste asbus.

tijdig einde tegemoet gaan. Het materiaal van deze onderdelen zal eenvoudig teloorgaan door aantasting via het oppervlak.

De diverse aantastingen kan een halt toegeroepen worden door de bedreigde plaatsen te voorzien van een slijtvaste en/of corrosievaste oppervlaktelaag. Zo zal de abrasieve slijtage ter plaatse van afdichtingen afdoende bestreden kunnen worden met een dun laagje Al_2O_3 , een materiaal dat overigens door zijn gebrek aan taaigheid absoluut ongeschikt zou zijn om er de hele as uit te vervaardigen. De erosie en corrosie van de waaier zou effectief bestreden kunnen worden met een Cr-Ni-materiaal aan het oppervlak. Dit materiaal zou eveneens geschikt kunnen zijn voor de waaier zelf. De prijs is dan veel hoger. Het aanbrengen van een dunne oppervlaktelaag kost weliswaar ook geld, maar er staan een aanzienlijke toename van de levensduur en betrouwbaarheid tegenover.

In plaats van het opspuiten van de as ter plaatse van de afdichting, zou de constructie, zoals weergegeven in figuur 3 kunnen worden toegepast. De asbus is gemaakt van staal met een gespoten oppervlaktelaag, die (bijv.) 50% wolframcarbide bevat. Dit materiaal heeft een hardheid tot 1800 kgf/mm^2 en vormt, mits goed gebonden aan het busmateriaal, een uitstekende weerstand tegen de abrasieve werking van de pakking. Door de onderdrukking van de asslijtage bij de pakking wordt vooral bereikt dat de afdichtende werking van de pakking-



bus in van d zienlij worde de pa blijft. wann zeker voort Met c licht de o extra werp betre

over: beha therr

De, (voeg door hand vorm In [1] gepre l ont Enge verba te de Enge Er zi vlakt type

tabe

type mate

a. v a a: a: b. th b b b b c. c c c d. n d d d d

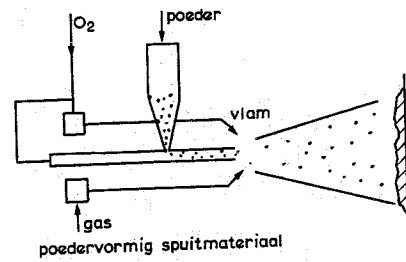
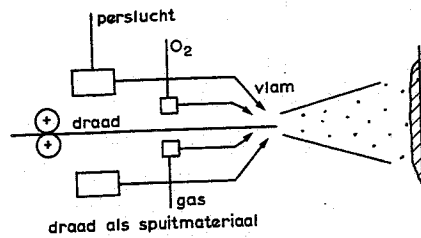
Uit:

bus intact blijft. Naast het voordeel van de niet-slijtende as, kan een aanzienlijke besparing in bedrijfskosten worden bereikt, doordat lekkage via de pakking tot een minimum beperkt blijft. Dit zal des te meer aanspreken wanneer de vloeistof als zodanig een zekere waarde vertegenwoordigt, bijvoorbeeld heet water. Met dit eenvoudige voorbeeld is wellicht duidelijk gemaakt dat speciaal de oppervlakken van machinedelen extra zorg vereisen tijdens het ontwerp door hun specifieke functie met betrekking tot de levensduur.

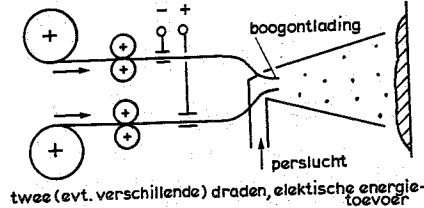
overzicht oppervlaktebehandelingen, plaats van thermisch spuiten

De oppervlaktefunctie kan toegevoegd worden aan het machinedeel door een reeks van oppervlaktebehandelingen. Thermisch spuiten vormt een van deze mogelijkheden. In [1] wordt een uitstekend overzicht gepresenteerd. Aan dit artikel is tabel I ontleend, waarvoor het zinvol is de Engelse terminologie te handhaven in verband met het feit dat het overgrote deel van de literatuur op dit gebied Engelstalig is. Er zijn drie hoofdtypen van oppervlaktebehandelingen onderscheiden: type 1: hierbij wordt het coating ma-

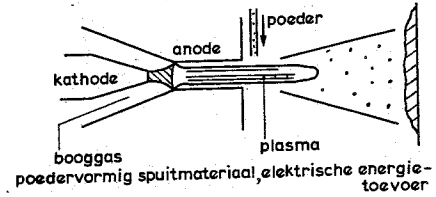
b1: flame spraying (vlamspuiten)



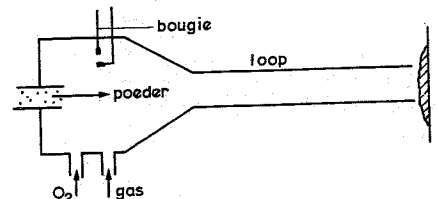
b2: arc spraying (boogspuiten)



b3: plasma spraying (plasma spuiten)



b4: detonation gun spraying (explosiespuiten)



poedervormig spuitmateriaal dat door schokgolven als gevolg van explosies door de lange loop gedreven wordt

4. Schema van de meest gangbare thermische spuitprocessen.

terial toegevoegd aan het oppervlak;
type 2: hierbij wordt de chemische samenstelling van het aanwezige ba-

sismateriaal gewijzigd;
type 3: hierbij wordt de microstructuur van het basismateriaal gewijzigd.

tabel I. Indeling van oppervlaktebehandelingen.

type 1 material added to surface	type 2 surface chemistry altered	type 3 surface microstructure altered
a. welding a1. gas a2. arc a3. plasma b. thermal spraying b1. flame b2. arc b3. plasma b4. detonation c. cladding c1. brazing c2. explosive bonding d. miscellaneous d1. spark hardening d2. powder coating d3. organic finishes d4. painting	e. electrodeposition e1. electrolysis (Aqueous) e2. metalliding e3. anodising e4. electrophoresis f. vapour deposition f1. physical f2. chemical g. chemical deposition g1. chemical plating g2. phosphating g3. chromating c. cladding c3. diffusion bonding d. miscellaneous d5. hot dipping	h. interstitial hardening h1. carburising h2. nitriding h3. carbonising h4. cyaniding h5. sulphonitriding h6. boriding i. diffusion treatment i1. siliconising i2. aluminising i3. chromising i4. sulphurising j. chemical treatment j1. etching j2. oxidation d. miscellaneous d6. impacting abrasives
		k. mechanical treatment k1. peening k2. rolling k3. machining l. thermal treatment l1. flame hardening l2. induction hardening l3. chill casting m. thermo-mechanical treatment m1. martensitic work hardening

Binnen type 1 is te onderscheiden dat het materiaal op diverse wijzen sterk afhankelijk van de agregatietoestand aangebracht kan worden:

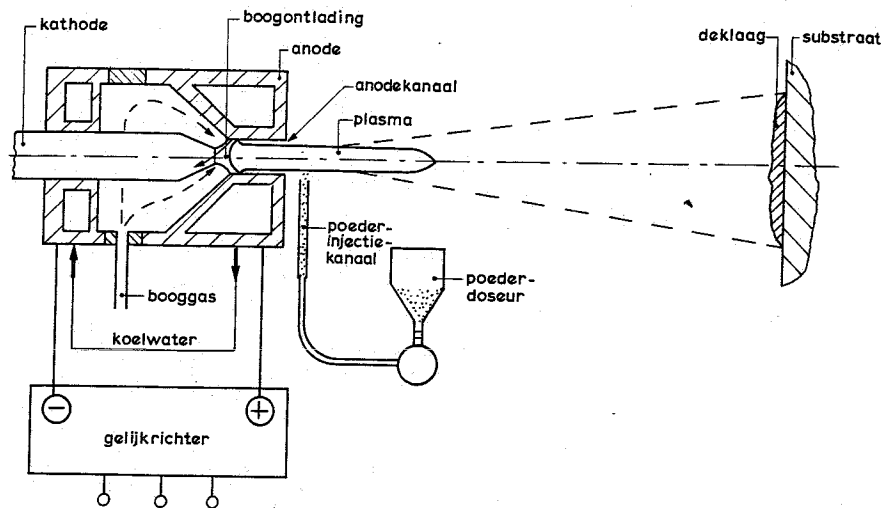
- a. als vloeistof, zoals bij de lasprocessen;
- b. in druppelvorm, respectievelijk in de vorm van discrete deeltjes, zoals bij thermisch spuiten;
- c. als compacte vaste stof al dan niet met behulp van een vloeibare tussenlaag.
- d. door middel van ionen in een vloeistof;
- e. in dampvorm;
- f. door chemische reacties van het substraat met een omringend medium.

Onder b worden vier thermische spuitmethoden genoemd. In figuur 4 zijn deze schematisch weergegeven. Het opspuitmateriaal kan in draad- of in poedervorm worden verwerkt. De vlamenergie wordt ontleend aan de verbranding van een gas (acetyleen of waterstof) of aan een elektrische bron. Bij de draadprocessen wordt het materiaal door de vlam eerst tot smelten gebracht en vervolgens, door de krachtinwerking van de vlamgassen of van een additionele persluchtstraal, versneld en geprojecteerd op een substraat. Bij de poederprocessen wordt het materiaal in de hete gasstroom van de vlam geïnjecteerd. De mate waarin de deeltjes worden opgewarmd, hangt sterk af van de vlameigenschappen. Er is niet altijd gegarandeerd, dat de deeltjes in gesmolten toestand de vlam verlaten.

Van de schematisch weergegeven processen zal nu speciaal aandacht geschonken worden aan plasmaspuiten met poedervormig materiaal.

plasmaspuiten

Figuur 5 toont een schema van het plasmaspuitproces. Tussen een wolfram kathode en bij anode met een centrale boring als anodekanaal wordt een elektrische boogontlading in stand gehouden. De boogontlading is alleszins te vergelijken met een lasboog. De kathode en anode zijn beschermd tegen te hoge temperatuur of gaserosie door een intensieve waterkoeling. De boogenergie wordt



5. Plasmaspuiten.

ten dele overgedragen aan het er doorheen stromende gas, dat bij zijn passage door het ontladingsgebied opwarmt, gedeeltelijk ioniseert en sterk expandeert.

Na de passage door de boog spreken we van plasma. Dit plasma, voornamelijk gekenmerkt door zijn hoge temperatuur en snelheid, wordt gebruikt als energieleverancier voor de spuitdeeltjes, die via een injectiekanaal in het plasma worden gebracht. Ze ondergaan hier een verhitting en een versnelling. Als een stroom van discrete deeltjes, met tamelijk grote verschillen in agregatietoestand, wordt het materiaal op het substraat gespoten. Zo ontstaat de deklaag. Het gehele proces wordt aangeduid met plasmaspuiten.

plasma

Het medium plasma verdient nadere toelichting. Een plasma voor spuitdoeleinden is een geheel of gedeeltelijk geïoniseerd gas met een relatief hoge temperatuur (6000 ... 20 000 K), een hoge specifieke enthalpie (4 000 ... 14 000 kJ/kg) en een hoge snelheid (200 ... 1 000 m/s) [2]. Deze cijfers zijn wellicht sprekerder als men ze vergelijkt met vertrouwde zaken. De oppervlaktetemperatuur van de zon is ~ 5800 K. De zon kan met het onbeschermd oog niet geobser-

veerd worden. Dit zou leiden tot ernstige beschadiging van het netvlies door de ultraviolette straling. Bij een spuitplasma is de uv-straling door de hoge temperatuur nog intenser. Een paar flitsen die het netvlies treffen zijn voldoende om 'lasogen' te veroorzaken. De specifieke enthalpie van een plasma is wel zeer hoog. Ter vergelijking: wit heet ijzer van 1000 °C heeft een specifieke enthalpie van ~ 460 kJ/kg.

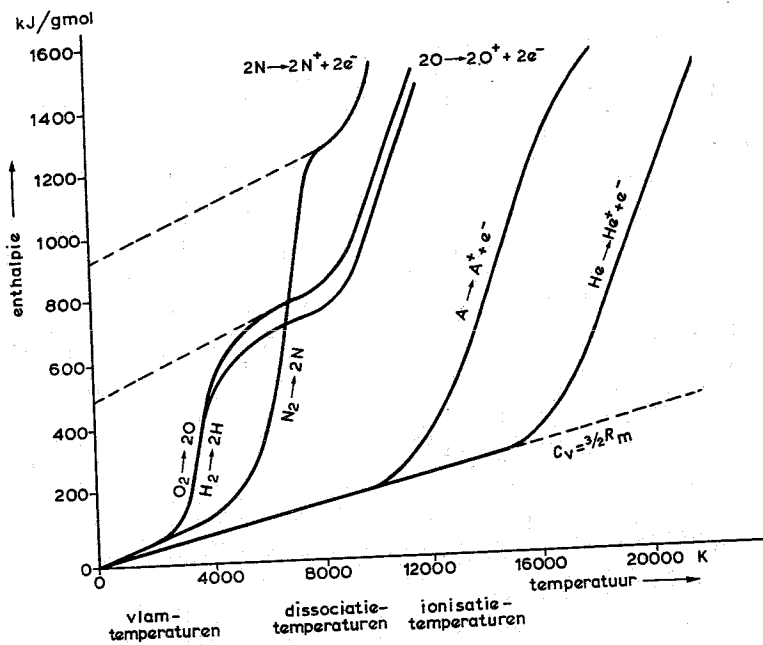
Dissociatie (bij tweeatomige gassen zoals N_2 en H_2) en ionisatie zijn processen die gepaard gaan met een aanzienlijke energieabsorptie. Van deze effecten wordt gebruik gemaakt bij spuitplasma's. In figuur 6 is de enthalpie als functie van de temperatuur weergegeven voor enkele veel gebruikte booggassen. Kenmerkend verschil tussen de tweeatomige en eenatomige gassen is het steile verloop van de enthalpiecurve bij de tweeatomige, hetgeen gepaard gaat met een relatief lage temperatuur. De uitstroomsnelheid van deze plasma's is daardoor geringer dan bij de eenatomige gassen.

De warmtegeleidingscoëfficiënt van een spuitplasma is een ander zeer belangrijke eigenschap. Ook hierin treden enorme verschillen op tussen twee- en eenatomige gassen, zoals blijkt uit figuur 7. Bij de applicatie dient gezocht te worden naar een juist compromis tussen snelheid, warmteinhoud en warmtegeleidingsvermogen van het plasma. Deze opgave is niet altijd eenvoudig.

6.
va
(1
19
19

ka

Ho
se
de
al
to
er
he
be
vl
te
la
he
wi
he
wi
ba
Hi
vl
de
Vi
m
sp
be
(A
te
di



6. Specifieke enthalpie als functie van de temperatuur [3].

(1 g mol A = 40 g, 1 g mol H_2 = 2 g, 1 g mol He = 4 g, 1 g mol N_2 = 28 g, 1 g mol O_2 = 32 g).

karakteristieke kenmerken

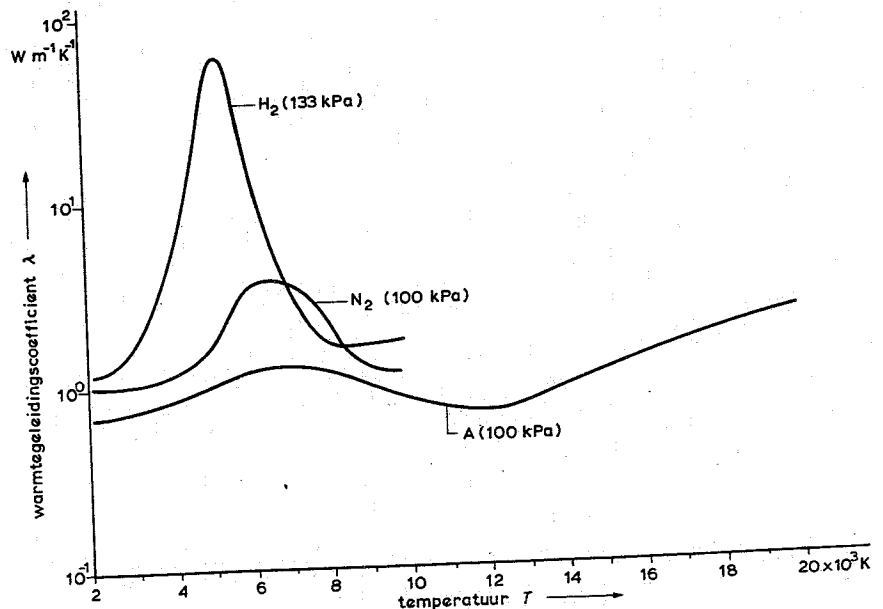
Hoe onderscheiden vlamspuitprocessen zich van andere coatingmethoden? Uit de indeling van tabel I blijkt al dat het materiaal in druppelvorm toegevoegd wordt aan het substraat; er is geen smeltbad zoals bij oplossen het geval is. Vlam en werkstuk zijn bewust van elkaar gescheiden. De vlam dient zo weinig mogelijk warmte toe te voeren aan het substraat. Bij lassen zorgt de vlam er juist voor dat het substraat lokaal gesmolten wordt, zodat een samenvoegen van het op te lassen materiaal met het werkstuk mogelijk wordt via de vloeibare fase.

Het is duidelijk dat niet alle stoffen in vloeibare toestand mengbaar zijn; denk bijvoorbeeld aan olie en water. Voor het combineren van dergelijke materialen zijn opspuitprocessen specifiek geschikt. Het is bijvoorbeeld mogelijk om aluminiumoxide (Al_2O_3), een veel gebruikt isolatiemateriaal voor warmte en elektriciteit, druppelsgewijze toe te voegen aan

het oppervlak, terwijl hier zeker geen macroscopische vermenging van Al_2O_3 en het onderliggende stalen substraat plaats heeft.

Het spuitdeeltje dat aan het oppervlak aankomt, voert zijn eigen ener-

7. Warmtegeleidingscoëfficiënt van plasmagassen als functie van de temperatuur [4].



gie-huishouding. Is het te koud, en daardoor wellicht niet helemaal vloeibaar, dan zal de vaste kern van het deeltje elastisch terugveren van het oppervlak; dit betekent verlies. Is het te zeer oververhit, dan zal een gedeelte verdampt zijn voordat het substraat wordt bereikt; ook dit betekent verlies. De kunst is, een deeltje met de meest geschikte combinatie van temperatuur en snelheid aan te bieden aan het substraat.

De hechting van zo'n individueel deeltje met het werkstuk komt op vele manieren tot stand. Primair is er sprake van een mechanische verankering van het gestolde deeltje in de haakjes van het door staalstralen opgeruwde oppervlak. De hechtsterkte die op basis hiervan te verwachten is, ligt in de orde van 1 tot 50 N/mm^2 . Het is zeker geen indrukwekkende waarde wanneer men dit getal vergelijkt met de treksterkte van gewoon constructiestaal, 350 N/mm^2 . Toch is deze hechting veelal voldoende wanneer drukspanningen of glijdende bewegingen een rol spelen.

Een betere hechting komt tot stand wanneer er tijdens het afkoelen van het deeltje gelegenheid geboden wordt tot een zekere mate van materiaaltransport tussen deeltjes en substraat, of tot een reactie van de materialen die aanwezig zijn op het oppervlak. Dergelijke 'metallurgische' in-

teracties kunnen leiden tot diffusielassen over geringe diepten of tot dunne amorfe tussenlagen van oxiden, die zowel hechten aan het oppervlak als aan het opgespoten deeltje. De hechtsterkten die hiermee worden bereikt, kunnen liggen in de orde van 50 tot 100 N/mm², een waarde die reeds licht stotende belastingen, punt- en lijncontacten of enigszins 'ruw bedrijf' toelaat, zonder dat de oppervlaktelaag wordt vernield.

Een nog grotere hechting treedt op wanneer een opgespoten laag achteraf ingesmolten wordt in het substraat. Hiervoor zijn speciale legeringen ontworpen die bij verhitting in het temperatuurtraject tussen 1050 °C en 1150 °C smeltende fasen vormen, die het oppervlak reinigen van aanwezige oxiden. Het gevolg is dat de materialen met elkaar reageren of in elkaar diffunderen. Er ontstaan zodoende zeer goede verbindingen. De hechtsterkte van deze lagen ligt in de orde van grootte van de substraatsterkte of daarboven. Bovendien zijn deze lagen door de onderlinge reacties van de deeltjes homogeen en nagenoeg vrij van poriën. De ingesmolten ongespoten lagen vormen de meest betrouwbare toepassing. Er zij echter benadrukt dat hierbij de opgespoten laag door middel van een extra warmtetoevoer pas goed tot hechting komt. In veel gevallen is deze extra warmtetoevoer niet geoorloofd, zoals bij een warmtebehandeld substraat. De voorgaande warmtebehandeling zou door het insmelten van de opgespoten laag volkomen teloorgaan, zodat het machinedeel qua bulkeigenschappen zijn functie niet meer kan vervullen. Een ander voorbeeld wordt gevormd door werkstukken die een ingewikkelde geometrie hebben. Warmtetoevoer betekent dan dat het werkstuk zal gaan vervormen, waardoor ontoelaatbare geometrieveranderingen kunnen optreden. In zulke gevallen is het geboden de oppervlaktelaag 'zo koud mogelijk' aan te brengen, waarbij de lage temperatuur betrekking heeft op het bulkmateriaal.

Het zal nu wellicht aanvaardbaar zijn dat in de thermische spuitprocessen vlam en substraat van elkaar gescheiden worden door het handhaven van

enige afstand tussen spuitpistool en substraat. Deze spuitafstand bedraagt 80 tot 200 mm, afhankelijk van de spuitparameters.

Het vermijden van vlamcontact met het werkstuk houdt automatisch in dat het spuitdeeltje over de spuitafstand moet worden getransporteerd. Tijdens dit transport verkeert het deeltje in een opgewarmde of vloeibare toestand. Het zal dan ook gretig reageren met de omringende atmosfeer. Het gevolg is: zuurstof- en stikstofabsorptie en oxidatie. Het materiaal komt niet chemisch onveranderd aan op het substraat. Vaak zijn deze veranderingen toegestaan of zelfs gewenst, maar bij een goed opspuitproces zou de mate waarin een reactie met de omgeving optreedt, regelbaar moeten zijn. De TH-Eindhoven verricht op dit gebied onderzoek, waarover later meer.

We hebben nu een van de karakteristieke kenmerken, de scheiding van vlam en werkstuk, enigszins toegelicht. Resumerend kan gesteld worden dat de gevolgen hiervan zijn: chemische verandering van het op te spuiten materiaal en een geringe warmteinteractie tussen opgespoten deeltjes en het substraat, respectievelijk andere deeltjes. De laag vertoont daardoor in het algemeen geringe weerstand tegen trekspanningen of punt- en lijncontacten. Wel ontstaat de mogelijkheid om allerlei vreemdsoortige materiaalcombinaties te maken.

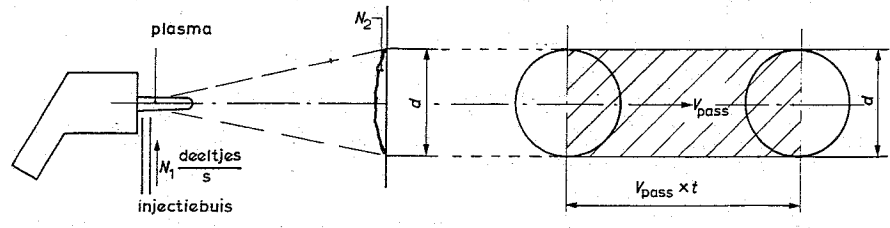
Een andere karakteristiek wordt gevormd door het lage energetische rendement, bijvoorbeeld bij plasmaspuiten. Alhoewel er forse elektrische vermogens worden gebruikt om het plasma op te wekken, is de uiteindelijke portie energie die terecht komt in de spuitdeeltjes, gering. Deze bewering kan met enkele cijfers worden toegelicht. De gelijkrichter voert secundair circa 40 kW toe aan

de plasmatoorts. Hiervan wordt circa 20 kW afgevoerd aan het koelwater, zodat 20 kW resteert aan enthalpie en kinetische energie van het plasma. De energie die terecht komt in de spuitdeeltjes is circa 1,5 kW, de resterende 18,5 kW gaat verloren door convectieve opmenging met de omgevingslucht en door uitstraling. Het rendement, gedefinieerd als de energie die terecht komt in de spuitdeeltjes, gedeeld door de energie die aan de toorts is toegevoerd, bedraagt dan: $(1,5/40) \times 100 \% \cong 3,8 \%$. Bij lasprocessen bedraagt dit ongeveer 80 %. Het lage energierendement van plasmaspuiten draagt ertoe bij dat de warmtestroom naar het substraat gering is. Niettemin dient gestreefd te worden naar een aanzienlijke verbetering van het proces op dit gebied.

De manier waarop de deklaag deeltje voor deeltje wordt gevormd, is een derde karakteristiek kenmerk. Zoals bij het eerste kenmerk al genoemd, is er geen macroscopisch smeltbad. De deeltjes worden discreet toegevoegd aan het substraat. Weliswaar zijn het er vele per tijdseenheid, maar omgerekend per seconde en per m² stollen er slechts enkele tientallen gelijktijdig, zoals uit de volgende berekening mag blijken (fig. 8). Voor het plasmaspuiten van het metaal molybdeen gelden onder meer dan de volgende parameters:

- poederdebiet: $\dot{\phi}_m = 40 \text{ g/min}$;
 - passagesnelheid van het spuitpistool: $v_{\text{pass}} = 40 \text{ mm/s}$;
 - gemiddelde deeltjesgrootte: $D = 50 \mu\text{m}$;
 - spuitkegeldiameter ter plaatse van substraat: $d = 25 \text{ mm}$.
- De dichtheid van molybdeen is 10200 kg/m³, zodat het gegeven poederde-

8. Schema voor de berekening van deeltjesdepositsnelheid.



biet
joen
 $N_1 =$
geld
- tot
resp
 $N_1 d$
- be
geld
het
- de
plaa
 $N_2 =$
Per
 $t =$
 $= 1$
De
met
stak
 $3 \times$
In t
per
 $=$
deelt
tjeh
 μm
due
kaar
len.
jes
beg
noo
ren.
plas
pisc
sub
vee
Blij
voc
de
boc
dee
toe
 A_d
 $\cong 1$
Dit
dee
na
Bij
mic
spu
Ter
hee
He

biet overeenkomt met circa één miljoen spuitdeeltjes per seconde. Stel $N_1 = 10^6$ deeltjes/s, in t seconden geldt dan:

- toegevoerd aan het plasma, respectievelijk aan het substraat: $t \times N_1$ deeltjes.

- bedekt substraattooppervlak = kegeldiameter \times afgelegde weg van het spuitpistool = $v_{\text{pass}} \times t \times d$ m².

- de gemiddelde deeltjesdichtheid ter plaatse van het substraat is dan:

$$N_2 = \frac{N_1 \times t \text{ deeltjes}}{v_{\text{pass}} \times t \times d \text{ m}^2}$$

Per seconde geldt:

$$t = 1 \text{ en } N_2 = \frac{N_1 \times 1}{v_{\text{pass}} \times 1 \times d} = 10^9 \frac{\text{deeltjes}}{\text{m}^2}$$

De stollingstijd t_s van een Mo-deeltje met een diameter van $50 \mu\text{m}$ op een stalen substraat is ongeveer: $t_s = 3 \times 10^{-7}$ s (uiterst snelle afkoeling!). In t_s seconden stollen dus gelijktijdig per m² substraattooppervlak: $t_s \times N_2 = 3 \times 10^{-7} \times 10^9 = 300$ deeltjes/m². Een platgeslagen deeltje heeft een diameter van circa $120 \mu\text{m}$ zodat de deeltjes volkomen individueel, zonder te interfereren met elkaars temperatuurvelden, zullen stollen. Er stollen immers maar 300 deeltjes per m² gelijktijdig. Voor een goed begrip van het opspuitproces is het noodzakelijk zich dit goed te realiseren. Immers, na de passage van de plasmaspuit zien we een macroscopisch dikke opgespoten laag op het substraat, die is opgebouwd uit een veelvoud van lamellen op elkaar.

Blijven we bij het voorgaande rekenvoorbeeld dan zien we dat per seconde per m² 10^9 deeltjes worden aangeboden aan het substraat. Deze 10^9 deeltjes bedekken in platgeslagen toestand een oppervlak van:

$$A_d = 10^9 \times \frac{\pi}{4} \times (120 \times 10^{-6})^2 \cong 11,3 \text{ m}^2.$$

Dit betekent dat er gemiddeld 11,3 deeltjes op elkaar gedeponerd zijn na één passage van de spuitbundel. Bij een lameldikte van $6 \mu\text{m}$ is de gemiddelde laagdikte na de beschreven spuitoperatie dus $11,3 \times 6 \cong 68 \mu\text{m}$. Ter vergelijking: goed verzinkt staal heeft een zinklaag van circa $20 \mu\text{m}$. Het individuele stollen is aan de hand

van deze gegevens nog nader toe te lichten. De spuitkegel met een diameter d ter plaatse van het substraat exposeert een substraatelementje gedurende de tijd: $t_{\text{exp}} = \frac{d}{v_{\text{pass}}} = \frac{25}{40}$ s

aan een bombardement van spuitdeeltjes. In de tijd t_{exp} wordt een laag van 11,3 lamellen opgebouwd, zodat de gemiddelde wachttijd t_w tussen de botsing van een deeltje met het voorgaande deeltje (nu lamel) bedraagt:

$$t_w = \frac{t_{\text{exp}}}{11,3} = 0,055 \text{ s.}$$

In 0,055 s zouden de spuitdeeltjes tijdens hun vlucht van spuitpistool naar substraat, bij een snelheid van $v_d = 100$ m/s, een weg s afleggen die gelijk is aan:

$$s = v_d \times t_w = 100 \times 0,055 = 5,5 \text{ m.}$$

Dat wil zeggen dat een deeltje gemiddeld een virtuele afstand van 5,5 meter verwijderd is van het voorgaande deeltje in dezelfde baan.

Indien een deeltje het voorgaande deeltje in dezelfde baan, in vloeibare toestand zou willen aantreffen, dient de afstand s_L tussen de deeltjes te bedragen: $s_L = t_s \times v_d$ (= de weg die het deeltje tijdens de vlucht aflegt terwijl het voorgaande deeltje aan het stollen is). $s_L = 3 \times 10^{-7} \times 100 = 30 \times 10^{-6} \text{ m} = 30 \mu\text{m}$. De reële afstand is echter: $s = 5,5$ m, zodat de conclusie gerechtvaardigd is dat de deeltjes elkaar niet in vloeibare toestand zullen aantreffen.

De genoemde karakteristieken leiden tot de meest algemene stelling omtrent opspuiten: opspuiten is een koud proces. Deze stelling kan experimenteel geverifieerd worden als men de warmtestroomdichtheden door het substraattooppervlak verge-

lijkt met bekende warme processen, zoals automatisch CO₂-lassen en handlassen met een elektrode (tabel II).

De warmtestroomdichtheden zijn voor de lasprocessen:

$$q'' = \frac{\text{stroom} \times \text{spanning} \times \text{tijd}}{\text{passagesnelheid} \times \text{lasbreedte} \times \text{tijd}}$$

handlassen:

$$q'' = \frac{200 \times 25}{3,6 \times 10} \cong 139 \frac{\text{watt}}{\text{mm}^2}$$

CO₂-lassen:

$$q'' = \frac{200 \times 25}{5,5 \times 11,5} = 79 \frac{\text{watt}}{\text{mm}^2}$$

Voor plasmaspuiten:

$$q'' = \frac{\left(\text{poederdebiet} \times \text{warmte-inhoud van de deeltjes} \right)}{\left(\text{passagesnelheid} \times \text{spuitkegeldiameter} \right)}$$

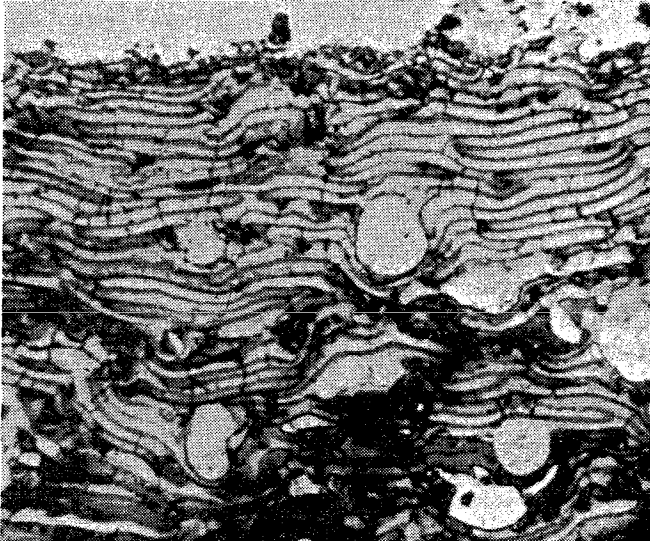
$$q'' = \frac{\frac{40}{60} \times 10^{-3} \times 1500 \times 10^3}{40 \times 25} \cong 1 \frac{\text{watt}}{\text{mm}^2}$$

Globaal bedraagt de warmtestroomdichtheid bij opspuiten dus circa 1 % van die van de lasprocessen. De koude aard van het opspuitproces ligt ten grondslag aan de mogelijke toepassingen maar ook aan de problemen die het proces oplevert. Resumerend kan met betrekking tot de toepassingsmogelijkheden gesteld worden dat oppervlakteaantastingen door slijtage en corrosie in veel gevallen effectief kunnen worden bestreden met behulp van opspuittechnieken. Daarbij zal de beïnvloeding van

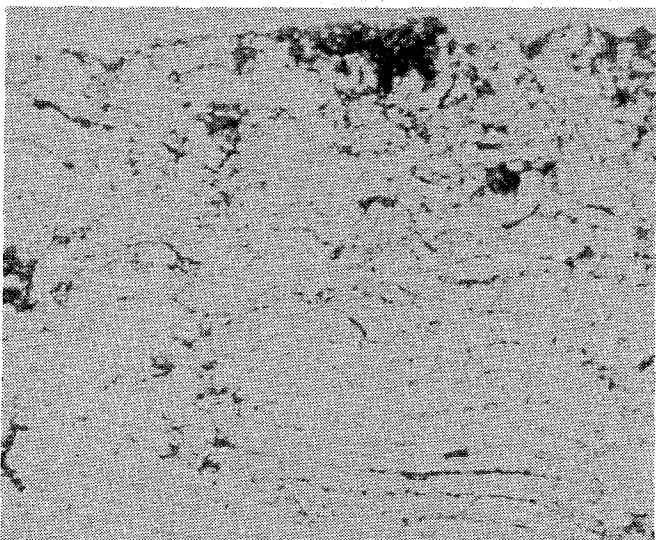
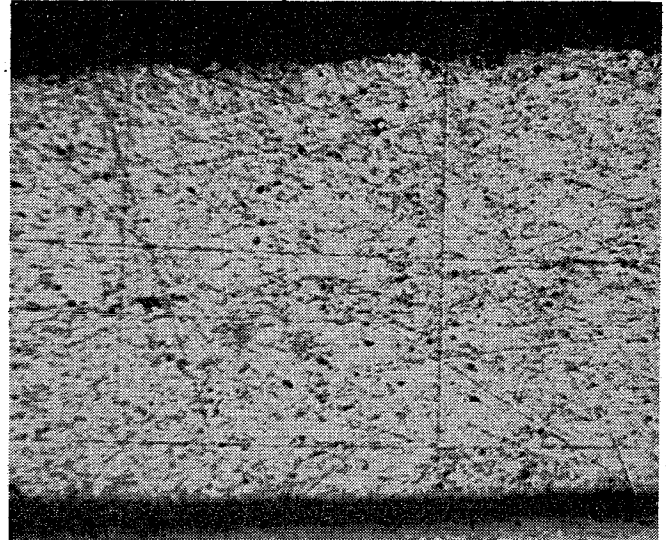
tabel II. Procesvariabelen van CO₂-lassen, handlassen met elektrode en plasmaspuiten.

procesvariabele	CO ₂ -lassen met gevulde draad	handlassen met contactelektrode \varnothing 4 mm	plasmaspuiten Mo op staal
debiet	g/min	42	40
stroom	ampère	200	200
spanning	vólt	25	25
passagesnelheid	mm/s	5,5	3,6
las/spuitbreedte	mm	11,5	10
warmte-inhoud van de spuitdeeltjes	kJ/kg	—	—
			≤ 1500

9. Slecht gespoten Mo-laag.

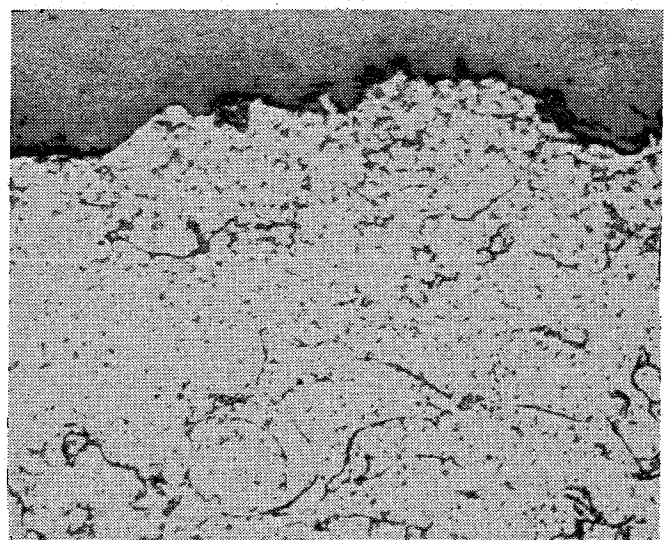
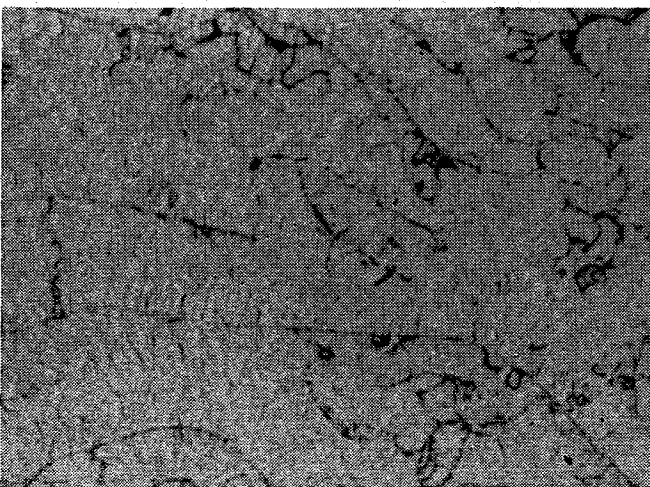


12. Al op staalsubstraat.



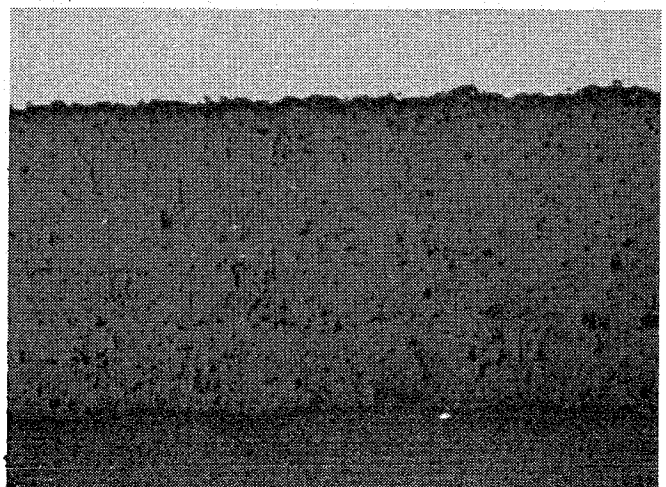
10. Mo op staalsubstraat.

11. Detail van figuur 10.



13. Detail van figuur 12.

14. Al_2O_3 op staalsubstraat.



de
warr
opsp
lijkhe
isole
telag
der
sme

stru

De
wor
stru
stra
ond
ting
rakt
Figu
slec
waa
(van
den
mel
lam
ges
sen
De
stru
ger
alun
ma
bee
ten
len
me
sto
die
eer
me
Te
ing
sie
me
me
oxi
nie
tre
lag
uit
slij
me
ide
sir
elk
dru
vo
ov

de bulkconstructie door proceswarmte gering zijn. Tevens bieden de opspuitprocessen uitstekende mogelijkheden voor het aanbrengen van isolerende en geleidende oppervlaktelagen en voor vormgeving van onder meer produkten met een hoog smeltpunt.

structuur van opgespoten lagen

De eigenschappen van deklagen worden grotendeels bepaald door de structuur en de hechting aan het substraat, respectievelijk van de deeltjes onderling. Zowel structuur als hechting hangen sterk samen met de karakteristieken van het opspuitproces. Figuur 9 toont de structuur van een slecht gespoten molybdeenlaag waarmee enkele typische kenmerken (van een slechte laag) kunnen worden toegelicht. De laag bestaat uit lamellen, bevat oxiden die als huid de lamellen omgeven, bevat poriën, ongesmolten delen en opgeloste gasen.

De figuren 10 tot en met 14 geven structuren van kwalitatief goede lagen van molybdeen, aluminium en aluminiumoxide als representatieve materialen. We zien hier een ander beeld. De lamelstructuur is ook hier ten dele aanwezig, maar de oxidevellen ontbreken, grove poriën zijn niet meer aanwezig en de opgeloste zuurstofgehalten bedragen niet meer dan die van het uitgangsmateriaal. Er is een goede overgang van de ene lamel naar de andere.

Te verwachten is dat zulke lagen ook ingezet kunnen worden voor corrosiebestrijding, omdat ze wellicht niet meer permeabel zijn voor corrosieve media. De poreuze lagen met veel oxidehuiden zijn niet sterk, althans zijn niet bestand tegen een behoorlijke trekspanning. Toch worden dit soort lagen (in een kwalitatief iets betere uitvoering) ruimschoots ingezet in de slijtagebestrijding. Als de poriën niet met elkaar verbonden zijn, vormen ze ideale oliereservoirs voor die toepassingen, waarbij machinedelen over elkaar glijden. Bij toenemende vlaktedrukken wordt de olie uit de reservoirs geperst. Hij komt tussen de over elkaar glijdende loopvlakken te

recht, zodat metallisch contact en daarmee slijtage wordt vermeden. Staan de poriën met elkaar in verbinding, dan is dit effect slechts te verwachten bij geringe vlaktedrukken. Zodra de druk toeneemt zal de olie in de laag weggeperst worden en ontstaat metallisch contact.

Echter ook hiervoor zijn toepassingen, bijvoorbeeld een variatorschijf brengt zijn vermogen door wrijving over aan de variatorriem. Er zal altijd een zekere mate van slijp optreden tussen riem en schijf, hetgeen als temperatuurverhoging van het systeem kenbaar wordt. Deze temperatuurstijging wordt bestreden door te koelen met olie die, indien hij niet gewenst is (ter plaatse van het contact tussen riem en schijf), eenvoudig verdwijnt in het poreuze oppervlak. Dank zij dit effect is onder meer mogelijk relatief veilig bij regenweer over een asfaltweg te kunnen rijden. Het poreuze wegdek neemt het water op gedurende de tijd dat het wiel erop drukt. Van de aanwezige oxiden is het bekend dat ze een gunstige uitwerking hebben op het slijtagegedrag van opgespoten lagen. In vrijwel elke andere toepassing zijn poriën en oxiden ongewenst, zodat het onderzoek aan de TH-Eindhoven sterk mede bepaald wordt door de wens, oxidatie en porositeit te elimineren uit een gespoten coating.

Oxidatie kan, naast de sterkte en taaiheid van een opgespoten materiaal, in grote mate de corrosievastheid aantasten. Molybdeen bijvoorbeeld is zeer resistent tegen zuren en lost alleen in kokend salpeterzuur op met merkbare snelheid. Molybdeenoxide echter is al oplosbaar in koud water. Indien een laag permeabel is voor vloeistoffen is de laag onbruikbaar als corrosiebescherming. Het corrosieve medium zal doordringen tot het substraat en hier zijn verwoestend werk kunnen verrichten. Door de vorming van corrosieprodukten wordt de opgespoten laag van het substraat weggedrukt; de laag bladdert af.

Toch is juist het terrein van anticorrosieve lagen van technisch belang. Het maakt in kosten enorm veel uit of een zware constructie geheel in bijvoorbeeld roestvaststaal uitgevoerd

moet worden of dat men kan volstaan met een dunne anticorrosielaag van dit materiaal op het ongelegeerd stalen ondergrond. Tevens is het vanuit sterkte-oogpunt zeer aantrekkelijk om opgespoten lagen als corrosiebescherming in te zetten. De laag heeft zonder nabehandeling meestal een beperkte weerstand tegen trekspanningen of stotende belastingen, maar deze zijn juist afwezig bij de specifieke corrosietoepassingen. De inzetbaarheid is echter beperkt door oxiden en poriën.

Met betrekking tot de sterkte-eigenschappen is een opgespoten laag betrouwbaar onder condities van drukspanning, glijdende wrijving van conforme contactvlakken en erosie. In het algemeen moeten trekspanningen, punt- en lijncontacten of stotende belastingen worden vermeden.

onderzoek aan plasmaspuiten

Plasmaspuiten bestaat in principe uit een aaneenschakeling van detailprocessen zoals reeds toegelicht is aan de hand van figuur 5. Nu kan men een aantal onderzoektrajecten uitstippelen. Zo zal het doorvoeren van technische verbeteringen aan bestaande apparatuur een dankbaar werkteerrein vormen voor inventieve geesten. Zowel standtijd van de elektrotroden, energierendement, hechtingspercentage en produktiesnelheid zouden nog aanzienlijk moeten worden verhoogd.

Men zou zich kunnen storten in onderzoek en ontwikkeling van opgespoten lagen. Voor de industrie is dit soort onderzoek met een relatief korte cyclustijd zeer aantrekkelijk: er wordt immers direct gewerkt aan een eindprodukt.

Een Technische Hogeschool is echter een instituut dat bij uitstek geschikt is voor langlopende projecten met een fundamenteel tintje. Het onderzoekresultaat dient bij voorkeur grensverleggend te zijn qua inzicht, kennis en applicatiemogelijkheden. Vanuit deze visie kan men plasmaspuiten reduceren tot de volgende detailprocessen:

- opwekking en regulering van het plasma; dit is de fase waarbij elektri-

sche energie uit het net overgedragen wordt aan de energiedrager plasma;

- overdracht van kinetische en thermische energie van het plasma aan de spuitdeeltjes;

- overdracht van de kinetische en thermische deeltjesenergie aan het substraat.

Om deze drie energietransmissieprocessen te laten plaatsvinden is apparatuur nodig. Deze vormt een afgeleide van de fysische modelvorming omtrent de gewenste processen. Het gewenste proces is op zijn beurt een afgeleide van de functionele eisen die gesteld worden aan het ermee te vervaardigen produkt: de opgespoten laag.

Hiermee is de technisch-wetenschappelijk te doorlopen cyclus voor het bestuderen van plasmaspuiten gegeven als een combinatie van apparatuurontwikkeling, processtudies en onderzoek van opgespoten lagen (fig. 15).

Processtudie heeft geleid tot een model voor het plasmaspuitproces. Dit model fungeert als een kapstok waaraan de gedachtenontwikkeling omtrent spuiten wordt opgehangen. Het model dient voortdurend aangepast te worden aan nieuwe inzichten op basis van metingen. Dit model omvat voor het deeltje in hoofdzaak:

- een thermische energiebalans:

$$\frac{\pi}{6} D^3 \rho_p C_p \frac{dT_p}{dt} = \alpha \pi D^2 (T_g - T_p) \quad (1)$$

- een impulsbalans in x- en y-richting:

$$F_x = m \frac{dv_x}{dt} = 3 \pi \eta D (c - v_x) \quad (2)$$

$$F_y = m \frac{dv_y}{dt} = - 3 \pi \eta D v_y \quad (3)$$

waarin:

D = diameter spuitdeeltje

ρ = dichtheid

C_p = soortelijke warmte van het spuitmateriaal

T = temperatuur

t = tijd

α = warmteoverdrachtscoëfficiënt

m = massa van een spuitdeeltje

v_x = snelheid van een spuitdeeltje in de richting van het substraat

v_y = snelheid van een spuitdeeltje loodrecht op v_x

η = dynamische viscositeit van het gas

c = gassnelheid

De index g verwijst naar gas; de index p naar spuitdeeltje (particle).

Het linker deel van vergelijking (1) beschrijft de warmteabsorptie door het deeltje; het rechter deel beschrijft de warmtetoevoer vanuit het gas. De vergelijkingen (2) en (3) geven de krachtswerking van het gas op het deeltje in twee onderling loodrechte richtingen weer.

Aan de hand van de oplossingen van deze drie vergelijkingen kunnen drie karakteristieke tijden voor het plasmaspuitproces gedefinieerd worden:

- de tijd die nodig is om een bepaalde hoeveelheid thermische energie door het deeltje te absorberen, de 'heat absorbtion time':

$$t_{ha} = \gamma \cdot \frac{R^2}{a_p} \quad (4)$$

- de tijd die nodig is om dezelfde hoeveelheid warmte aan te voeren door het plasma, de 'heat supply time':

$$t_{hs} \cong \frac{1}{3} \cdot \frac{R^2}{a_p} \cdot \frac{\lambda_p}{\lambda_g} \ln \left(\frac{T_g - T_{p,0}}{T_g - T_p} \right) \quad (5)$$

- de tijd die nodig is om het deeltje een bepaalde eindsnelheid v_x te ge-

ven, de 'dwell time':

$$t_{dw} = \frac{2R^2 \rho_p}{9\eta} \ln \left(\frac{c}{c - v_x} \right) \quad (6)$$

De factor γ bepaalt de homogeniteit van de opwarming van een spuitdeeltje; $\gamma = 0,3$ betekent bijvoorbeeld dat de kerntemperatuur 90 % bedraagt van die aan het oppervlak. Verder is:

$$a_p = \frac{\lambda_p}{\rho_p C_p}, \text{ de temperatuurvereffeningscoëfficiënt van het spuitmateriaal;}$$

λ = warmtegeleidingscoëfficiënt.

Met behulp van de vergelijkingen (4), (5) en (6) kan de volgende operatievoorwaarde voor het plasmaspuitproces geformuleerd worden:

$$t_{dw} \geq t_{hs} \geq t_{ha} \quad (7)$$

Jitgewerkt:

$$\frac{2 \rho_p a_p}{9\eta} \ln \left(\frac{c}{c - v_x} \right) \geq \frac{1}{3} \cdot \frac{\lambda_p}{\lambda_g} \ln \left(\frac{T_g - T_{p,0}}{T_g - T_p} \right) \geq \gamma \quad (8)$$

Voldoen aan relatie (7) respectievelijk (8) betekent dat alle toegevoerde warmte vanuit het gas door het deeltje geabsorbeerd wordt en dat de totale procestijd groot genoeg is om de gewenste snelheid v_x op te bouwen. Figuur 16 toont schematisch een relatie tussen de drie karakteristieke tijden.

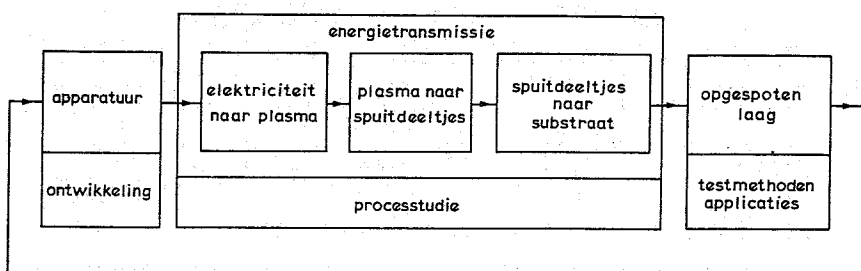
Aan de ideale operatievoorwaarde (7) is slechts te voldoen door goed geleidende materialen. De ligging van a_p , ρ_p is afhankelijk van de normstelling omtrent het gewenste niveau van doorwarming, dus van de grootte van factor γ . Een en ander is nader uitgewerkt in [5].

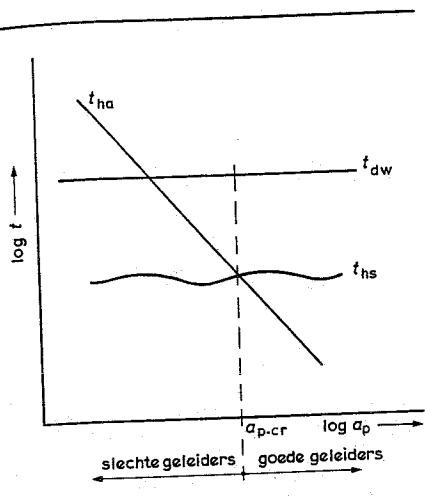
Resumerend kan hier gesteld worden dat relatie (8) de belangrijkste spuitparameters in hun onderling verband aangeeft. Dit zijn: de materiaalparameters: ρ_p , a_p , λ_p , $T_{p,0}$ en de gasparameters: η , λ_g , T_g , c . De interactie van het plasmagas en de spuitdeeltjes resulteert in de materiaaluitgangparameters: T_p en v_x .

Het rechter gedeelte van relatie (8) bepaalt het gewenste temperatuurniveau van het plasma; het linker gedeelte regelt de gewenste plasmasnelheid en (via v_x) de afmetingen van het plasma.

Het onderzoekprogramma van de TH-Eindhoven naar plasmaspuiten

15. Schema technisch-wetenschappelijk onderzoek van plasmaspuiten.





16. Relatie van de drie karakteristieke tijden.

voorziet onder meer in het volgende:

- Het meten van plasma-eigenschappen zoals elektronenbezetting, gas-temperatuur, -dichtheid en -snelheid. Tevens omvat dit programma het meten van de eindparameters van het spuitmateriaal: de deeltjessnelheid en -temperatuur. De vakgroep deeltjesfysica van de afdeling natuurkunde levert hieraan een onmisbare bijdrage.

Het ontwikkelen van normen voor de spuitdeeltjeseigenschappen. Met name de vraag naar de optimale combinatie van snelheid en temperatuur, gerelateerd aan substraat en spuitmilieu, dient beantwoord te worden. Vervolgens kan het spuitproces gericht worden op het realiseren van deze optimale deeltjeseigenschappen.

Als illustratief voorbeeld kan men zich afvragen of een spuitdeeltje overhit ($T > T_m$) moet zijn of juist niet gesmolten. Een oververhit en snel deeltje zal tijdens de botsing met het substraat uit elkaar spatten, terwijl een langzaam, net niet gesmolten deeltje als een dot stopverf zal deformeren tot een soort pannekoek met krimp-scheuren.

De normstelling ontbreekt nagenoeg geheel binnen dit vakgebied, zij vormt een witte vlek in de technologie van thermisch spuiten. Het botsproces van een deeltje met een substraat is te reduceren tot een gelijktijdige uitwisseling van thermische en kinetische energie. Het onderzoek

aan dit deelproces wordt momenteel opgezet met behulp van een hoogfrequente plasmatoorts. Met dit apparaat hopen we binnenkort individuele deeltjes met een regelbare en meetbare temperatuursnelheidscombinatie te kunnen deponeren. Dit deel van het onderzoek is zeer geschikt voor eindstudenten.

- Het onderzoek van opgespoten lagen richt zich vooral op de mechanische belastbaarheid. Vanuit de deeltje-voor-deeltje-interactie met het substraat wordt gewerkt aan modelvorming omtrent residuele spanningen, scheurvorming en reststerkte van de laag. Ook dit is een onderwerp dat door eindstudenten wordt bewerkt.

Een veelbelovende ontwikkeling van de laatste twee jaar is ongetwijfeld het *Heet Isotatisch Persen* (HIP) van opgespoten, slijtvaste lagen. Met deze methode worden eigenschappen als hechting, sterkte en dichtheid aan de gespoten laag toegevoegd door een gericht gekozen nabehandeling onder hoge temperatuur en druk. Dit initiële onderzoek is uitgevoerd in nauwe samenwerking met een industrie in Nederland [6].

- De apparatuurontwikkeling is erop gericht te voldoen aan de eisen die voortvloeien uit de fysische formulering van de interactie: plasma ↔ deeltje. Vooral slechtgeleidende materiaal-deeltjes kunnen slechts met een zekere homogeniteit opgewarmd worden als het plasma, relatief gezien, lang, volumineus, langzaam en niet te warm is. De huidige plasmaspuiten produceren een plasma dat, met soortgelijke termen omschreven, de volgende eigenschappen heeft: kort, gering in omvang, snel en heet. Het zal duidelijk zijn dat op grond van deze discrepanties er volgens ons totaal nieuwe apparatuur ontwikkeld dient te worden. Samenwerking met de industrie is daarbij zeer gewenst. Ontwikkelingsconcepten en initiële industriecontacten zijn aanwezig.

In het laboratorium wordt momenteel vrij intensief gewerkt aan de ontwikkeling van schermbuizen die tot taak hebben het plasmaspuiten af te sluiten van de beïnvloeding door de omringende atmosfeer. Zodoende kunnen spuitdeeltjes behoed worden voor gasopname en oxidatie. De duc-

tiliteit, poreusheid en sterkte van de gespoten laag worden hiermee sterk in gunstige zin beïnvloed. Ook over deze ontwikkelingen is binnenkort informatie ter beschikking [7].

slot

Tot slot van een overzichtsartikel zou een serie markant gekozen toepassingen kunnen dienen. Om de indruk te vermijden dat thermische spuittechnieken een panacee vormen voor elk oppervlakteprobleem, is een verwijzing naar de internationale literatuur hier op zijn plaats. Tijdschriften die verband houden met materiaal-technologieën, vooral lastijdschriften, brengen in toenemende mate interessante publikaties over dit vakgebied. Inmiddels is ook een schat aan gegevens opgeslagen in de rapporten van acht voorgaande internationale spuitconferenties, waarin zowel fabrikanten als gebruikers van opspuitapparatuur rapporteren over succesvolle toepassingen en het hanteren van deze technologie in het algemeen. Thermisch spuiten is zeker geen panacee voor elk oppervlakteprobleem, maar biedt, mits weloverwogen, goede perspectieven voor het economisch en functioneel oplossen van slijtage-, corrosie-, isolatie- of geleidingsproblemen.

literatuur

1. James, Smart and Reynolds. *Wear*, 1975, 34 (374).
2. Houben, J.M. en Zaat, J.H.: Analysis of a plasma torch. Paper 28. Proc. 7th Metal Spraying Conf., London 1973.
3. Brochure Philips: Der Induktionsplasma-brenner und seine Theorie.
4. Au, G.F.: Elektrische Antriebe von Raumfahrzeugen. Verlag G. Braun, Karlsruhe 1968.
5. Houben, J.M.: Remarks concerning a rational plasma for thermal spraying. Te publiceren rapport 9e Int. Thermal Spraying Conf., Den Haag, mei 1980.
6. Van Nederveen, H.B., Verburgh, M.B. en Houben, J.M.: The densification of plasma sprayed coatings bij subsequent hot isostatic pressing. Te publiceren rapport 9e Int. Thermal Spraying Conf., Den Haag, mei 1980.
7. Houben, J.M. en Van Liempd G.G.: Problems encountered in the development of locally shielded plasma spray devices. Te publiceren rapport 9e Int. Thermal Spraying Conf., Den Haag, mei 1980.