

# Dikke deklagen

## Selectie en keuzecriteria in relatie met functionaliteit

Deze publicatie is gemaakt om een overzicht te geven van de mogelijkheden en onmogelijkheden van het toepassen van dikke deklagen ( $> 10 \mu\text{m}$ ) op producten. Naast deze publicatie verschijnen in het kader van het project "Nieuwe coatingtechnieken voor het MKB" nog vier andere publicaties die gezamenlijk een goed beeld geven van coatingtechnologie in het algemeen en van de vele aspecten die daarmee samenhangen.

De andere vier publicaties (te downloaden via <http://www.coating-online.nl>) zijn:

- TI.05.23 "Dunne deklagen",
- TI.05.25 "Thermisch gespoten aluminiumlagen",
- TI.05.26 "Coaten van producten uit dunne plaat" en
- TI.05.27 "Kwaliteitsborging van (harde) deklagen".

### Inhoud

1	Inleiding	1
2	Functionaliteit van de deklaag	1
2.1	Vermoeiingssterkte	3
2.2	Reparatie	3
2.3	Isolerende en geleidende coatings	3
2.4	Slijtvastheid	4
2.5	Corrosievastheid	4
2.6	Esthetische deklagen	7
3	Gebruikscondities waaronder de deklaag moet functioneren	7
4	Ontwerpaspecten bij de keuze van een deklaagtechniek	7
5	Keuze van een deklaagtechniek	8
5.1	Oplassen	8
5.2	Lasercladden	11
5.3	Thermisch spuiten	13
5.4	Explosief cladden	16
5.5	Elektrochemische processen	18
5.6	Stroomloze metaalafscheiding	19
5.7	Badprocessen	20
6	Kostenaspecten	21
7	Normen en normering	24
8	Milieu- en Arbo-aspecten	24
9	Voorbeelden van toepassingen	26
10	Referenties	26

## 1 Inleiding

In deze publicatie wordt binnen het project 'Nieuwe coatingtechnieken voor het MKB' (zie ook de website [www.coating-online.nl](http://www.coating-online.nl)) ingegaan op het selectie/keuze-proces van dikke en mega-dikke deklagen, waarbij de laagdikte varieert tussen  $10 \mu\text{m}$  en  $10 \text{ mm}$ . Binnen de 'Oppervlakte Engineering' staat hiervoor een breed scala aan technieken ter beschikking aan de ontwerper/constructeur. Binnen dit project kan daarom geen compleet overzicht worden gegeven. Op basis van een binnen het project uitgevoerd marktonderzoek is daarom een keuze gemaakt voor een aantal technieken. Deze technieken zijn: thermisch spuiten, oplassen, explosief cladden, lasercladden, alsmede elektrolytische en thermische deklaag-technieken. Daarbij staat de functionaliteit van een deklaag centraal. In deze publicatie zal slechts beperkt worden ingegaan op de techniek van het proces waarmee een deklaag wordt aangebracht. Hiervoor wordt verwezen naar uitgebreide literatuur, waaronder voor oplassen en thermisch spuiten VM 95 en VM 108. Voor lasercladden is de "TI.00.11" beschikbaar en voor elektrolytische en thermische stroomloze processen de VOM Vademecum. De beide VM-publicaties en TI.00.11 zijn te downloaden op de website "[www.coating-online.nl](http://www.coating-online.nl)".

Op de website wordt kort ingegaan op het brede scala aan technieken in de Oppervlakte Engineering en de positionering van de informatie die op deze website te vinden is. In deze publicatie wordt aansluitend hierop ingegaan op het selectieproces voor een deklaag. Dit is onder te verdelen in:

- **Vaststellen van de gewenste functionaliteit.** De deklaag moet een probleem oplossen (zie hoofdstuk 2).
- **Vaststellen onder welke gebruikscondities de deklaag moet functioneren.** Daarbij wordt ervan uitgegaan

dat er altijd sprake is van een systeem. Hierbij wordt onder het systeem de combinatie van materiaal-ontwerp/bedrijfscondities-milieu verstaan (zie hoofdstuk 3).

- **Vaststellen van de relevante ontwerpaspecten.** Op het moment dat een keuze is gemaakt voor een deklaag/deklaagsysteem, wordt de wijze van aanbrengen van de deklaag, de deklaagtechniek, mede bepaald door ontwerpaspecten. Afhankelijk van het ontwerp bieden verschillende deklaagtechnieken verschillende mogelijkheden. Mogelijk kan een deklaag met slechts een beperkt aantal technieken worden aangebracht en moet hiermee bij het ontwerp rekening worden gehouden. Deze informatie is van essentieel belang voor de ontwerper/constructeur (zie hoofdstuk 4).

- **Keuze van de deklaagtechniek.** Deze publicatie beperkt zich daarin tot de 'dikke deklagen'. In dit hoofdstuk wordt ingegaan op een aantal van deze deklaag-technieken. Afhankelijk van de gekozen deklaag, het gekozen ontwerp en aspecten gerelateerd aan de uiteindelijke productie en assemblage wordt een deklaagtechniek gekozen. Bij deze keuze zullen de integrale kosten een belangrijke rol spelen (zie hoofdstuk 5 en 6).

- **Milieu- en Arbo-aspecten** (zie hoofdstuk 8).

Voor een belangrijk deel worden deze onderwerpen aan de hand van keuzematrices of selectietabellen ondersteund. In deze matrices wordt op een indicatieve wijze de toepasbaarheid van de verschillende deklaagtechnieken in relatie tot ontwerpaspecten, gebruikscondities en functionaliteit aangegeven, zodat de ontwerper/constructeur snel een eerste selectie kan maken. Het beschreven proces voor de selectie van (dikke) deklagen is schematisch weergegeven in figuur 1.1.

Gezien de vergaande specialisatie van de deklaag applicateurs en de kennis en ervaring die daar aanwezig is, zal uiteindelijk overleg essentieel zijn om tot een verantwoorde keuze en goed eindresultaat te komen.

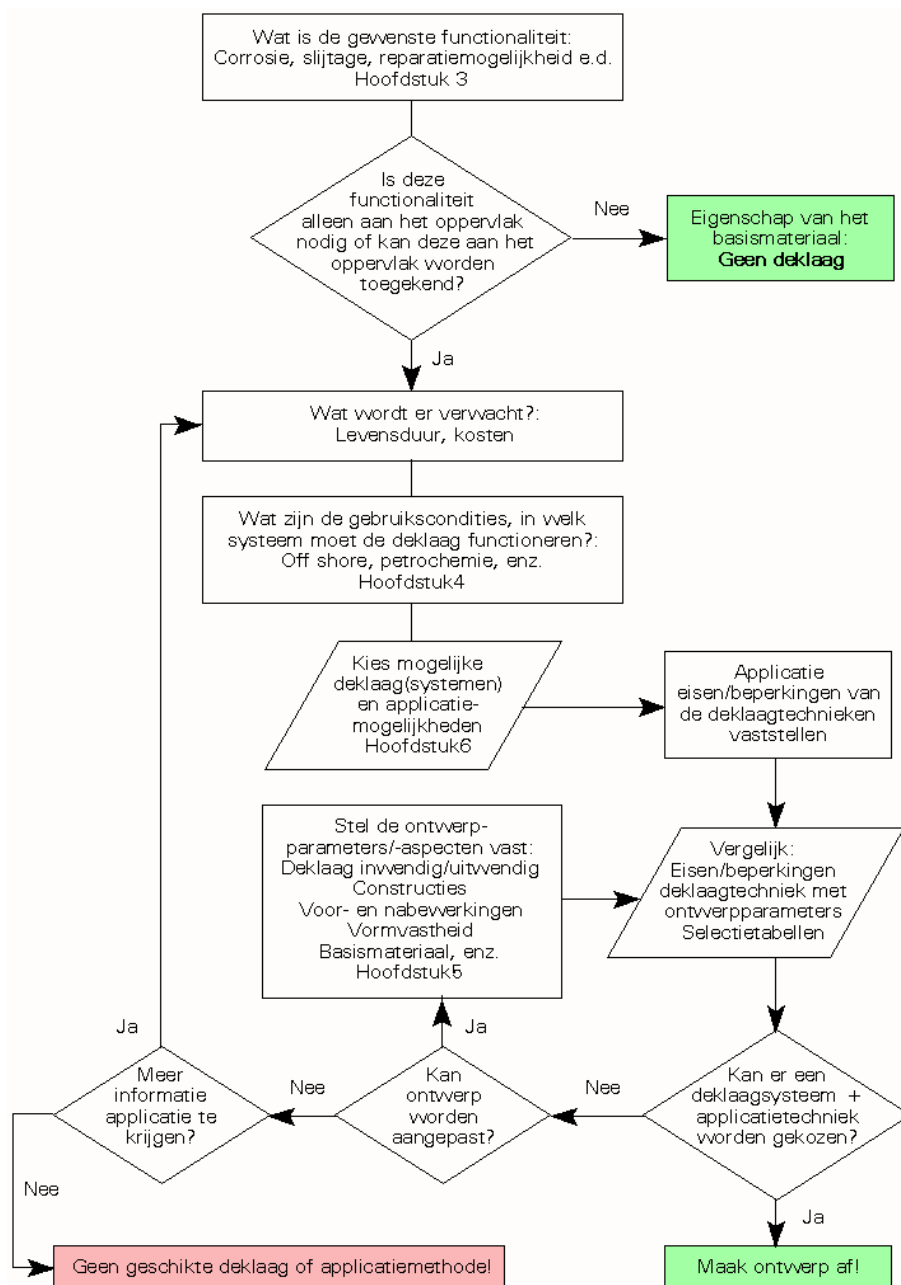
## 2 Functionaliteit van de deklaag

Voordat een deklaag kan worden gekozen, moet eerst worden vastgesteld welke functionaliteit van de deklaag wordt verwacht. Daarvoor is het belangrijk te definiëren wat onder functionaliteit wordt verstaan. In deze publicatie wordt onder functionaliteit van een deklaag verstaan:

*De mogelijkheid om aan een gedefinieerd productoppervlak zodanige eigenschappen te geven, dat het product onder vastgelegde gebruikscondities gedurende een bepaalde termijn naar wens kan functioneren.*

Uit deze definitie volgt dat:

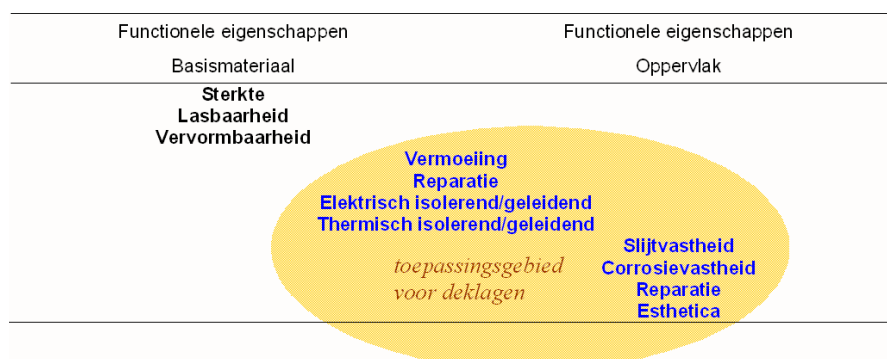
- de gevraagde functionaliteit van een deklaag een functionaliteit van het oppervlak is;
- de gevraagde functionaliteit goed en juist omschreven moet zijn;
- de gebruikscondities goed omschreven moeten zijn;
- er duidelijkheid moet bestaan over de verwachte levensduur/gebruikstermijn.



figuur 1.1 Schematische voorstelling keuze en ontwerpproces bij deklagen

Vanuit de applicatie worden van het product bepaalde functionele eigenschappen verwacht. Deze eigenschappen kunnen worden opgedeeld in eigenschappen die van

het basismateriaal (substraat) worden gevraagd en eigenschappen die specifiek van het oppervlak worden gevraagd (zie figuur 2.1).



figuur 2.1 Toepassingsgebied van deklagen afhankelijk van de functionaliteit

Daarnaast zijn er functionele eigenschappen die op basis van gelijkwaardigheid zowel door het basismateriaal als het oppervlak kunnen worden vervuld (zie figuur 2.1). Functionele eigenschappen van het oppervlak kunnen vaak ook door het basismateriaal worden geleverd. Als echter van een product zowel basismateriaaleigenschappen als oppervlakte-eigenschappen worden gevraagd die met elkaar in conflict zijn, wordt doorgaans naar een compromis gezocht. Dit kan leiden tot een niet optimale materiaalkeuze of ontwerp en daarmee tot bijvoorbeeld onnodig hoge kosten. Een optimaal ontwerp en materiaalkeuze vragen in dat geval om functioneel gescheiden ontwerpen.

Deklagen vinden hun toepassing in functionele eisen die van het oppervlak worden verlangd. Als de functionaliteit alleen van het basismateriaal kan komen, is de applicatie van een deklaag niet zinvol en onnodig duur. Hierna wordt alleen nog ingegaan op het toepassingsgebied voor deklagen. *Een deklaag draagt daarbij niet bij aan de functionele eigenschappen van het basismateriaal, maar kan deze echter wel beïnvloeden.*

## 2.1 Vermoeiingssterkte

Vermoeiing is gedefinieerd als een fenomeen waarbij een onderdeel onder een wisselende belasting staat, waarbij de hoogste spanning lager is dan de treksterkte van het materiaal en waarbij het onderdeel uiteindelijk zal falen [18].

Het vermoeiingsproces is onder te verdelen in een drietal fasen:

1. **Initiatiefase**, waarin de scheur wordt gevormd.
2. **Groefase**, waarin de scheur doorgroeit tot een afmeting, waarbij de resterende doorsnede de hoogste belasting niet meer kan opnemen.
3. **Falen van het onderdeel door overbelasting**, doorgaans onverwachts en zonder waarschuwing vooraf. Hiermee wordt bedoeld dat het onderdeel zonder macroscopisch zichtbare plastische vervorming faalt. Dit maakt het noodzakelijk onderdelen, die onder een wisselende belasting staan boven de vermoeiingsbelasting, regelmatig op scheurvorming te controleren.

Vermoeiing is een faalmechanisme dat aan of vlak onder het oppervlak van een onderdeel initieert. De initiatiefase van vermoeiing kan bij een goed ontwerp 80-90% van de levensduur bedragen. Afhankelijk van de toepassing en de oppervlaktecondities kan dit echter substantieel lager zijn. Daarmee is weerstand tegen vermoeiing deels te karakteriseren als een functionaliteit die van het oppervlak wordt gevraagd.

In de praktijk wordt een aantal vermoeiingsmechanismen onderscheiden:

- **Mechanische vermoeiing**: een zuiver mechanische belasting, waarbij de spanning kan wisselen tussen drukspanning en trekspanning en zich alleen onder trekspanning kan afspelen of alleen onder drukspanning.
- **Thermische vermoeiing**: onder invloed van temperatuurwisselingen optredende wisselende mechanische belasting.
- **Corrosievermoeiing**: een combinatie van wisselende mechanische belasting en een corrosieve belasting.
- Een **combinatie van mechanische belasting en thermische wisselingen**.

Of en hoe snel vermoeiing optreedt hangt af van het systeem (materiaal-gebruikscondities-milieu) waarin een onderdeel moet functioneren. Tabel 2.1 geeft een overzicht van vermoeiingsmechanismen en de belangrijkste parameters die hierbij een rol spelen. Een grijs vlak in de tabel geeft aan dat de betreffende parameter invloed heeft op het desbetreffende vermoeiingsmechanisme. Voor meer informatie over vermoeiingsmechanismen wordt verwezen naar de website [www.coating-online.nl](http://www.coating-online.nl), onder het menu-item "Publicaties".

tabel 2.1 Vermoeiingsmechanismen en parameters die deze mechanismen beïnvloeden

vermoeiingsmechanisme parameter	mechanisch	corrosie	thermisch	mechanisch /thermisch
max. spanning				
spanningsamplitude				
oppervlakteruwheid				
oppervlaktedefecten				
interne (rest) trekspanningen	verlaagd vermoeiingsgrens			
interne (rest) drukspanningen	verhoogd vermoeiingsgrens			
spanningsconcentraties				
corrosiegevoeligheid		verkort initiatiefase		
thermische uitzettingscoëfficiënt				
rekgrens				

## 2.2 Reparatie

Reparatie is een veel gebruikte toepassing van deklagen. Deze reparatie kan betrekking hebben op:

- herstel van de maatvoering nadat bijvoorbeeld te veel aan materiaal is afgenomen in een bewerkingstap.
- herstel van de maatvoering nadat een onderdeel is gesleten. Dit is doorgaans goedkoper dan een nieuw onderdeel aanschaffen. Het kan hierbij zowel gaan om slijtage die onverwacht is opgetreden, als om situaties waarbij verwachte, dan wel bekende slijtage optreedt, bijvoorbeeld bij regulier onderhoud.
- herstel van schade, bijvoorbeeld scheuren, corrosie en dergelijke. Een deel van het materiaal met scheuren kan worden weggenomen, waarna reparatie met een deklaag kan plaatsvinden. Voorwaarde is daarbij dat de scheurdiepte niet te groot is, zodat de sterkte van de constructie behouden blijft.

Afhankelijk van het onderdeel en deklaagtechniek kan reparatie op locatie of in een werkplaats plaatsvinden (zie tabel 2.2). In het laatste geval zal duidelijk zijn dat de kwaliteit hoger kan liggen, reden waarom reparatie in een werkplaats de voorkeur heeft.

Bij de keuze voor een reparatietechniek moet uiteraard rekening worden gehouden met de functionaliteit en ontwerpaspecten.

tabel 2.2 Deklaagtechniek voor reparatietoepassingen

Techniek	Op locatie	laagdikten [mm]
lasercladden	nee	0,1 - 3
oplassen	ja	2 - 10
thermisch spuiten	ja	0,1 - 5
elektrolytisch galvaniseren	nee	0,05 - 1
tampongalvaniseren	ja	

## 2.3 Isolerende en geleidende coatings

Door het toepassen van een deklaag kunnen thermisch of elektrisch geleidende eigenschappen aan een oppervlak worden gegeven.

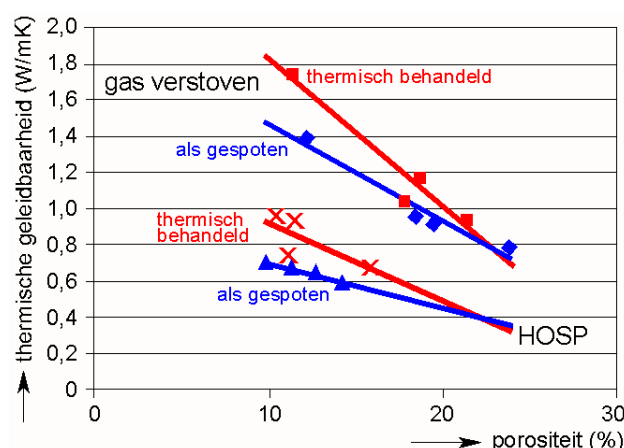
### 2.3.1 Thermische isolatie

Het bekendste voorbeeld is de toepassing van *Thermal Barrier Coatings*, TBC's, op turbineschoepen van vlieg-

tuigmotoren. Doel van de toepassing is verhoging van de toelaatbare bedrijfstemperatuur en het tegengaan van thermische veroudering en vermindering van de mechanische eigenschappen van het basismateriaal. De werking van deze deklagen berust op:

- ▶ lage thermische geleidbaarheid van de deklaag;
- ▶ de aanwezigheid van porositeit in de deklaag. Deze porositeit verlaagt de thermische geleidbaarheid (zie figuur 2.2) en ondervangt de verschillen in thermische uitzetting tussen deklaag en basismateriaal.

YSZ, Yttriumoxide gestabiliseerd zirconiumoxide ( $\text{ZrO}_2\text{-}8\%\text{Y}_2\text{O}_3$ ), is een van de meest toegepaste materialen als TBC. Deze deklaag en vergelijkbare deklagen worden met atmosferisch plasmaspuiten opgebracht. Meer voorbeelden en informatie over thermisch en elektrisch isolerende deklagen vindt u op de website [www.coating-online.nl](http://www.coating-online.nl) onder het menu-item "Publicaties".



figuur 2.2 Indicatie voor de thermische geleidbaarheid van YSZ afhankelijk van de dichtheid (HOSP = Hollow Spherical Powder, een poreus poeder)

### 2.3.2 Elektrische isolatie/geleiding

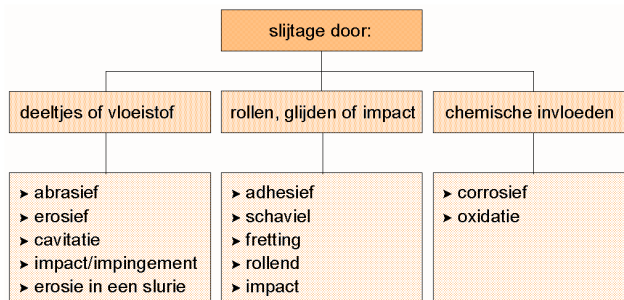
Voor het aanbrengen van een elektrisch geleidende deklaag komen in principe alle geleidende materialen in aanmerking. Deze deklagen kunnen worden aangebracht met lasercladden, oplossen, thermisch spuiten, galvanische methoden en explosief cladden. De meerwaarde ligt echter in de toepassing van een relatief dure deklaag met een lage elektrische weerstand op een goedkoop basismateriaal met voldoende sterkte, zodat geen duur massief materiaal gebruikt hoeft te worden. Bij explosief cladden is hiervan een voorbeeld gegeven (zie § 5.4).

Elektrische isolatie kan worden verkregen met de meeste keramische materialen. Aluminiumoxide is een goed voorbeeld hiervan. Deze lagen worden onder andere aangebracht met thermisch spuiten, APS (Autogeen poederspuiten) en HVOF (High Velocity Oxygen Fuel). Daarbij moet bedacht worden dat de geleidbaarheid van sommige keramische materialen afhankelijk is van de temperatuur. Boven bepaalde temperaturen verandert de laag dan van een elektrische isolerende naar een elektrisch geleidende laag. Voor zirconium-oxide geldt bijvoorbeeld dat deze boven een temperatuur van 950 °C elektrisch geleidend wordt.

### 2.4 Slijtvastheid

Slijtvastheid is een algemeen begrip dat veel mechanismen omvat en waarbij slijtage geen materiaal- of deklaageigenschap is, maar een systeemeigenschap. Dit betekent dat de functionaliteit afhankelijk is van het gehele systeem, materiaal-deklaag-milieu-gebruikscondities.

Dit dient men zich te realiseren, voordat de gewenste functionaliteit in dit kader kan worden vastgesteld. Een indeling naar type slijtage is weergegeven in figuur 2.3. VM108 [1] geeft een nadere beschrijving van de verschillende slijtagemechanismen.



figuur 2.3 Indeling naar slijtagemechanisme

De weerstand tegen slijtage oftewel het slijtagegedrag wordt, afhankelijk van het slijtagemechanisme, beïnvloed door de verschillende systeemparameters die in het systeem een rol spelen (zie tabel 2.3). In relatie tot de slijtvastheid wordt vaak de hardheid als sturende materiaalparameter gebruikt. De hardheid is echter niet bij alle slijtagemechanismen de bepalende factor en bij geen van de slijtagemechanismen de enige. Tabel 2.3 geeft een indicatie welke proces- en materiaalparameters een rol spelen bij verschillende slijtagemechanismen.

De verschillende proces- en materiaalparameters die een rol spelen bij bepaalde slijtagemechanismen bepalen dus de keuze voor een deklaagsysteem.

Voor meer diepte-informatie en toelichting over slijtagemechanismen wordt verwezen naar informatie op de website [www.coating-online.nl](http://www.coating-online.nl), onder het menu-item "Publicaties".

### 2.5 Corrosievastheid

Net als slijtage is corrosie een systeemeigenschap. Dus de combinatie van materiaal/deklaag-bedrijfscondities-milieu bepalen of en in welke mate corrosie optreedt. Corrosieve aantasting kan in principe op twee manieren optreden:

1. Algemene corrosie, hierbij wordt het materiaal over het hele oppervlak min of meer gelijkmatig aangetast.
2. Lokale corrosie, hierbij treedt corrosie lokaal op, doorgaans als gevolg van constructieve oorzaken (spleten, kieren, materiaalcombinaties) of afwijkende milieucondities (overgang van temperatuur), of lokale beschadigingen waardoor materiaal geactiveerd wordt.

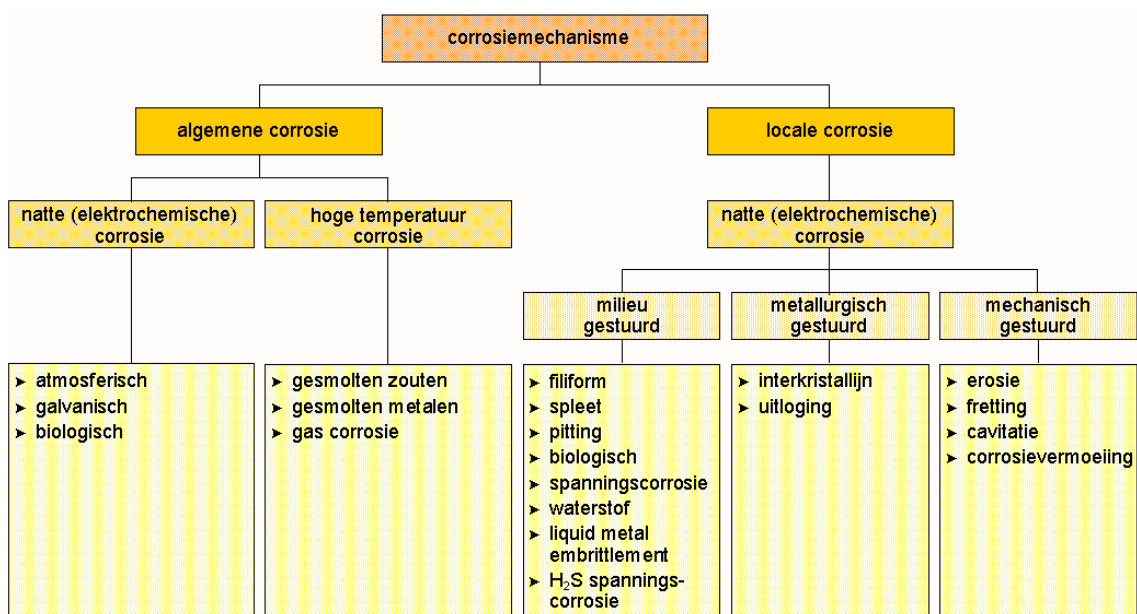
Verder moet onderscheid worden gemaakt tussen natte (elektrochemische) corrosie en gascorrosie (doorgaans bij veel hogere temperaturen). De corrosieprocessen zijn voor deze twee toepassingen totaal verschillend. Figuur 2.4 geeft een indeling van corrosiemechanismen. De verschillende corrosiemechanismen ontleen hun naam doorgaans aan hun verschijningsvorm (pitting, algemene corrosie), constructieve oorzaken (spleten, restspanningen), milieu (chloride spanningscorrosie, gas corrosie, atmosferisch). In tabel 2.4 is een overzicht gegeven van een aantal corrosiemechanismen en door welke materiaaleigenschappen, milieu- en procesparameters, alsmede ontwerpaspecten deze corrosiemechanismen worden beïnvloed. Dit overzicht zal niet compleet zijn, maar zij geeft echter wel een indruk van de complexe relaties die tussen deze parameters bestaan.

tabel 2.3 Overzicht van de slijtagemechanismen en materiaal-, oppervlakte- en milieuparameters die een rol spelen

slijtage mechanisme	materiaal parameter										oppervlak			milieu										
	hardheid (basismateriaal vs deeltjes)	E-modulus	rekgrens	kerfthaalheid	koudversteving	restspanningen	smelttemperatuur	microstructuur	oxidehuid (als corrosiebescherming)	chemische samenstelling	wrijvingsweerstand	ruwheid	materiaalcombinaties	type abrasief	temperatuur	snelheid	hoek van inslag	belasting	belasting amplitude	frequentie	vochtigheid	corrosieve invloeden	zuurstof partiedruk vacuum	smearing
abrasief				m.n. bij keramiek																				
erosief																								
cavitatie																								
impact/impingement																								
erosie in een slurry																								
adhesief																								
schaviel																								
fretting										afhankelijk van mat. combinatie														
rollend																								

Een grijs vlak betekent dat de betreffende parameter invloed heeft op het betreffende slijtagemechanisme  
N.B.: Voor een nadere beschrijving van de slijtagemechanismen wordt onder andere verwezen naar de publicatie VM 108 [1]





figuur 2.4 Indeling van corrosiemechanismen

tabel 2.4 Overzicht van corrosiemechanismen en materiaal-, milieu-, proces- en ontwerpaspecten

		parameter																		
		materiaaleigenschappen								milieu/gebruik scondities			ontwerpaspecten							
		chemische samenstelling								microstructuur	hardheid	elektrolyt	chemie milieu (Cl, S, O <sub>2</sub> , e.d.)	temperatuur	(rest)spanningen	materiaal combinatie(s)	ruwheid	spleten	verzamelpunten	vocht
algemeen	Cr	Al	Si	Mo	Ni	Co	Ti													
corrosiemechanismen																				
algemene corrosie - nat	atmosferisch		+			+			—											
	galvanisch																			
	biologisch		+			+		+												
algemene corrosie - hoge temperatuur	gesmolten zouten																			
	gesmolten metalen (LME)																			
	gascorrosie		+	+	+	+		+	—											
locale corrosie	filiform																			
	biologisch		+			+		+												
	waterstof																			
	Liquid Metal Embrittlement																			
	(Cl-)spanningscorrosie		+			+	+													
	H <sub>2</sub> S-spanningscorrosie																			
	interkristallijn		+			+														
	putvormige corrosie (pitting)		+			+														
	spleetcorrosie		+			+														
	uitloging																			
	erosie																			
	fretting																			
	cavitatie																			
	corrosievermoeiing																			
Een grijs vlak betekent dat de betreffende parameter invloed heeft op het desbetreffende corrosiemechanisme																				

Een grijs vlak betekent dat de betreffende parameter invloed heeft op het desbetreffende corrosiemechanisme

Omdat corrosie typisch een functionaliteit is die van het oppervlak wordt gevraagd, zijn deklagen zeer geschikt om te worden toegepast bij corrosiebescherming. De corrosiebescherming door deklagen berust daarbij op één of een combinatie van de volgende mechanismen:

- **Kathodische bescherming:** de deklaag offert zich op ten gunste van het basismateriaal. Voorbeelden zijn verzinkt en gealuminiseerd staal. Aluminium heeft daarbij nog het voordeel dat het aluminiumoxiden vormt, die een extra bescherming bieden, doordat beschadigingen zo gerepareerd worden. Voor meer informatie over dit mechanisme wordt verwezen naar de publicatie "Thermisch gespoten aluminium deklagen". Aluminiumdeklagen geven daardoor bij een gelijke laagdikte langer bescherming dan zinklagen. Deze vorm van corrosiebescherming wordt ook wel als actieve bescherming aangeduid. In feite is kathodische bescherming een gecontroleerde vorm van galvanische corrosie.
- **Afscherming (barrière coating):** het basismateriaal wordt afgeschermd tegen het milieu door een inerte deklaag. Dit kan een organische, metallische of keramische deklaag zijn die inert is in het betreffende milieu. Voorbeeld zijn verflagen, keramische deklagen, zoals chroomoxide, of metallische deklagen van een metaal of legering bestand tegen het milieu. Deze vorm van corrosiebescherming wordt ook wel als passieve bescherming aangeduid.

Op de website [www.coating-online.nl](http://www.coating-online.nl) onder het menu-item "Publicaties" wordt nader op een aantal corrosiemechanismen in de natte (elektrochemische) en hoogetemperatuur (gas) corrosie ingegaan. Dit om de lezer een indruk te geven van de aspecten die bij de selectie van een deklaag een rol spelen. Hier wordt onder andere aandacht besteed aan hoe corrosie te voorkomen dan wel te beperken tot aanvaardbare proporties. In het kader van deze publicatie voert het te ver om op al deze corrosiemechanismen in te gaan. Voor meer achtergrondinformatie over corrosiemechanismen wordt verwezen naar algemeen toegankelijke literatuur, waaronder VM108 [1]. Op de website [www.corrosion-doctors.org](http://www.corrosion-doctors.org) is eveneens veel informatie over corrosiemechanismen te vinden.

## 2.6 Esthetische deklagen

Deklagen worden naast de genoemde functionele, meer operationele, redenen ook om esthetische redenen aangebracht. Hiervoor zijn aparte normen en regelgeving. Onder andere voor de organische deklagen zijn deze uitgebreid omschreven. Voorwaarde voor de toepassing van deze deklagen is wel dat zij de operationele functionaliteit van een product niet mogen verminderen. In deze publicatie wordt primair ingegaan op de operationele kant van constructies en hoe deklagen daar een bijdrage aan kunnen leveren. Daarom wordt hier niet nader op de esthetische toepassing van deklagen ingegaan, anders dan de toepassing hiervoor te noemen.

## 3 Gebruikscondities waaronder de deklaag moet functioneren

Onder gebruikscondities worden verstaan de condities waaronder een deklaag in het systeem moet functioneren. De gebruikscondities spelen een zeer belangrijke rol bij de selectie van deklagen en deklaagapplicatietechnieken.

Gebruikscondities kunnen gerelateerd worden aan een aantal aspecten (zie tabel 3.1). In kader 3.1 worden voorbeelden gegeven van aandachtspunten bij de selectie van een deklaag in relatie tot de gebruikscondities.

tabel 3.1 Indeling gebruikscondities

milieu	industrie	operationele condities
zeecondities (chloriden, e.d.) tropisch waterig gas hoge temperatuur lage temperatuur (bijv. cryogeen) zuur basisch	(gas)turbines-luchtvaart (gas)turbines-land stoomturbines automobil voedingsmiddelen proces petrochemie papier medisch nucleair architectuur glas offshore scheepsbouw gereedschapmakerij -productiegebonden gereedschapmakerij -niet productiegebonden elektronica olie defensie metaal agrarisch	temperatuur temperatuurwisselingen impact belasting (cavitatie, inslaande deeltjes) vermoeiing/trillingen wisselende condities statische en/of dynamische belasting slijtage

Voorbeelden van aandachtspunten bij de selectie van een deklaag in relatie tot de gebruikscondities:

### Materiaalcombinatie- mechanische belasting

Bij de keuze van de deklaag moeten de gebruikscondities goed worden beschouwd. Voorbeeld is de selectie van een corrosievaste deklaag waarbij tijdens het gebruik onder invloed van het milieu of de bedrijfscondities, de deklaag aan hoge punt- of lijnbelastingen wordt blootgesteld. Harde oppervlaktelagen op zachte substraten kunnen daarbij, als gevolg van zogenaamde Hertze-spanningen over het grensvlak tussen basismateriaal en deklaag, delamineren.

Deklagen, toegepast om materiaal tegen impact te beschermen moeten daarom met de grootste zorg worden gekozen, omdat anders delaminatie van de deklaag kan optreden.

### Gebruikstemperatuur:

Zinklagen polen in water boven de 70 °C om, daardoor gaat het staal het zink kathodisch beschermen in plaats van andersom.

Zirkoniumoxide deklagen, aangebracht als elektrische isolator, worden elektrisch geleidend boven de 950 °C.

kader 3.1 Afhankelijkheid van de eigenschappen op de manier van aanbrengen

## 4 Ontwerpaspecten bij de keuze van een deklaagtechniek

Afhankelijk van de gekozen deklaag en deklaagapplicatietechniek, moet de ontwerper rekening houden met de mogelijkheden en beperkingen van de deklaag en de aanbrengtechniek. Als bijvoorbeeld de deklaag inwendig moet worden aangebracht, beperkt dit de keuze van de toe te passen deklaagtechniek. Als na het aanbrengen van een deklaag nog (na)bewerkingen op het product moeten worden uitgevoerd, moet de aangebrachte deklaag hiertegen bestand zijn, of beschermd kunnen worden. Tabel 4.1 geeft een overzicht van aspecten waarmee rekening gehouden dient te worden.

Het is uiterst belangrijk dat de ontwerper/constructeur zich bewust is van deze zaken en daarmee al in het prille ontwerpstadium rekening houdt. Men moet niet in de eindfase van een ontwerp gaan nadenken over deklagen, maar dit in het beginstadium doen.

In hoofdstuk 5 "Keuze van een deklaagtechniek" wordt per techniek, indien van toepassing, nader op deze aspecten ingegaan.

tabel 4.1 Ontwerpaspecten bij de keuze van een deklaagtechniek

geometrische aspecten	productie aspecten	toepassing gerelateerde aspecten	onderhoud	einde levensduur
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ afrondingen/overgangen</li> <li>➤ moet de deklaag inwendig worden aangebracht</li> <li>➤ moet de deklaag na het aanbrengen nog vervormbaar zijn</li> <li>➤ nabewerken</li> <li>➤ voorbewerkingen</li> <li>➤ toegankelijkheid</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ effecten op constructieve sterkten</li> <li>➤ elastisch toelaatbare rekken</li> <li>➤ effecten op geometrie en maatnauwkeurigheid</li> <li>➤ thermische belasting tijdens het aanbrengen van de deklaag</li> <li>➤ opmenging met het basismateriaal</li> <li>➤ vormvastheid</li> <li>➤ lange termijn eigenschappen (treed er bijvoorbeeld diffusie op tijdens gebruik bij hoge temperaturen)</li> <li>➤ assemblage. Beperkt de deklaag verbindingstechnieken</li> <li>➤ mogelijke laagdikten tegen nodige laagdikten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ restspanningen</li> <li>➤ statische bedrijfsbelasting</li> <li>➤ dynamische bedrijfsbelasting</li> <li>➤ wisselende belastingen</li> <li>➤ verbindingen</li> <li>➤ compatibiliteit met andere materialen: kan de deklaag bijvoorbeeld wel op het beoogde basismateriaal worden aangebracht? Treedt er galvanische corrosie op?</li> <li>➤ stromende vloeistoffen</li> <li>➤ max. bedrijfstemperaturen</li> <li>➤ hechting van de deklaag</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ reinigen</li> <li>➤ reparatie</li> <li>➤ is de deklaag op locatie aan te brengen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ recycling</li> <li>➤ afval</li> <li>➤ ...</li> </ul>

## 5 Keuze van een deklaagtechniek

Aan de hand van figuur 1.1 en voorgaande hoofdstukken 2, 3 en 4 is een selectie gemaakt voor de functionele eisen die aan de deklaag worden gesteld en is inzicht verkregen in de gebruikscondities en ontwerpaspecten die een rol spelen bij de keuze voor de deklaagtechniek. In dit hoofdstuk zal een handreiking gedaan worden om te komen tot een mogelijke keuze. Naast dit hoofdstuk zijn de al eerder genoemde selectietabellen hierbij een belangrijk hulpmiddel.

Vanwege de omvang van het aantal te behandelen technieken, wat op zich al niet volledig kan zijn, wordt voor een nadere beschrijving van de technieken verwezen naar de website [www.coating-online.nl](http://www.coating-online.nl) en reeds bestaande naslagwerken (zie Referenties). Tabel 5.1 geeft een overzicht van de in deze publicatie behandelde deklaagtechnieken. Daarbij kan een grove indeling naar smeltprocessen en depositietechnieken worden gemaakt. Het onderscheid hierbij is dat bij smeltprocessen (ook) het basismateriaal wordt omgesmolten en bij depositietechnieken niet.

De in tabel 5.1 behandelde technieken hebben elk hun eigen karakteristieken die afhankelijk van de gewenste

functionaliteit positief of negatief uitwerken. Om hierin een eerste inzicht te geven is in tabel 5.2 een overzicht gegeven van de belangrijkste karakteristieken van de behandelde deklaagtechnieken die een rol spelen bij de selectie van een deklaag met de gewenste functionaliteit.

Daarna wordt in de volgende paragrafen kort op de technieken ingegaan waar het de functionaliteit betreft en wordt voor diepte-informatie verwezen naar de website [www.coating-online.nl](http://www.coating-online.nl) en standaardreferenties.

### 5.1 Oplassen

Van de in tabel 5.1 genoemde oplasprocessen zijn het elektroslaklassen met band en het PPAW proces relatief nieuw. Ze kennen de laatste jaren een verdere ontwikkeling en worden in deze publicatie nader behandeld. Voor de andere lasprocessen wordt voor een nadere beschrijving verwezen naar VM108 [1]. Deze publicatie is via de website [www.coating-online.nl](http://www.coating-online.nl) te downloaden. Tevens wordt op deze website meer informatie gegeven over 'Oplassen' onder het menu-item "Publicaties".

tabel 5.1 Overzicht van de behandelde deklaagtechnieken

smeltprocessen		depositieprocessen		
oplassen (§ 5.1)	lasercladden (§ 5.2)	thermisch spuiten (§ 5.3)	explosief cladden (§ 5.4)	dompelprocessen (§ 5.5, 5.6 en 5.7)
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Autogeenlassen</li> <li>➤ BmBE (Booglassen met beklede elektrode)</li> <li>➤ MIG/MAG (Metal Inert Gas/Metal Active Gas)</li> <li>➤ TIG (Tungsten Inert Gas)</li> <li>➤ OP (Onder Poeder lassen)</li> <li>➤ Plasma</li> <li>➤ Elektroslaklassen</li> <li>➤ Elektroslaklassen met band</li> <li>➤ PPAW (Plasma Powder Arc Welding)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ CO<sub>2</sub>-lasers,</li> <li>➤ Nd:YAG-lasers</li> <li>➤ Diodelasers</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ autogeen draad/poeder spuiten</li> <li>➤ HVOF (High Pressure - High Velocity Oxygen Fuel)</li> <li>➤ HP-HVOF (High Pressure-High Velocity Oxygen Fuel)</li> <li>➤ HVAF draad/poeder (High Velocity Air Fuel)</li> <li>➤ 'Cold spray'-proces</li> <li>➤ Detonatie spuiten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Explosief cladden van dikke plaat</li> <li>➤ Explosief folie cladden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Elektrochemische processen-Galvanotechniek</li> <li>➤ Stroomloze metaalafscheiding</li> <li>➤ Badprocessen</li> </ul>



tabel 5.2 Samenvatting van de karakteristieken van deklaagtechnieken in relatie tot de functionele eigenschappen

deklaagtechniek						
parameter/karakteristiek	smeltprocessen		depositieprocessen			
	oplassen	lasercladden	thermisch spuiten	explosief cladden	elektrolytisch coaten	stroomloze processen
ontwerpaspecten:						
opmenging	5 - 60%	5 - 10%	geen	geen	geen	diffusielaag
warmte-inbreng	laag-hoog	laag en alleen lokaal (<0,5 mm)	zeer laag, basismateriaal niet beïnvloed	geen, basismateriaal niet beïnvloed	geen, basismateriaal niet beïnvloed	laag, relaxatie restspanningen
restspanningen	hoog	laag	laag (in de deklaag)	laag, lokaal zeer hoge drukspanning	geen	laag
hechting	hoog (metallisch)	hoog (metallisch)	laag-gemiddeld (mechanisch)	hoog (mechanisch/metallisch)	laag	gemiddeld
porositeit	geen	geen	0,5 - 20%	geen	geen	geen
impactbestendigheid	hoog	hoog	laag-gemiddeld	hoog	laag	gemiddeld
voorbewerking	laskant, ontvetten en oxiden verwijderen	kan vaak achterwege blijven	gritstralen, ontvetten en oxiden verwijderen	schuren/gritten, ontvetten	ontvetten, oxidehuid verwijderen	ontvetten, oxidehuid verwijderen
nabewerking (afhankelijk van toepassing)	slijpen, frezen	kan vaak achterwege blijven	slijpen, frezen, polijsten	walsen of (draad)-trekken is mogelijk	geen	geen
eindbewerking	ja	ja	ja	nee	ja	ja
halffabrikaat	soms	soms	ja	ja (bijna altijd)	ja	ja
geometrie:						
afronding/randen	0,3 mm	0,1 mm	5 mm	n.b.	scherpe overgangen vermijden	geen beperking
dikte basismateriaal	> 5 mm	> 1 mm	> 0,5 mm	> 0,1 mm (met ondersteuning)	n.b.	n.b.
inwendig	> 350 mm	> 12 mm	> 60 mm	> 10 mm	toegankelijk voor elektroden	geen praktische beperkingen
laagdiktebereik	1 - 10 mm	0,1 - 2 mm	0,1 - 2 mm	0,1 - 10 mm	0,02 - 0,15 mm	0,02 - 0,15 mm
materialen						
materiaalcombinaties	elektrisch geleidend, metallisch	metallisch	nagenoeg alles mogelijk	minimaal 10% plastische vervorming	elektrisch geleidend	bestand tegen badtemperatuur
metallisch						
cermets						
keramisch						
toepassingen:						
corrosievastheid						
slijtvastheid						
reparatie						
esthetica						
De grijze vlakken geven de toepasbaarheid van de verschillende deklaagtechnieken aan						

### 5.1.1 Oplaskarakteristieken

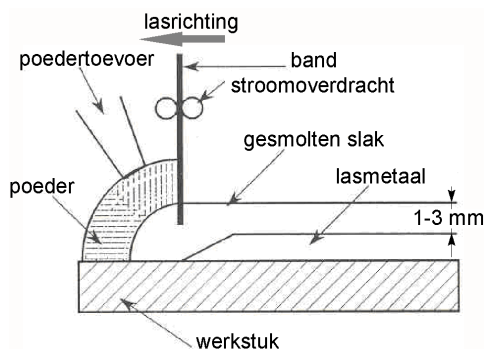
Tabel 5.3 geeft een overzicht van de verschillende kenmerken van de diverse oplastechnieken. Voor een nadere beschrijving van de lasprocessen, wordt verwezen naar VM108 "Corrosiebestendige en slijtvaste oppervlaktelagen door oplassen en thermisch spuiten" [1].

### 5.1.2 Elektrolaklassen met band, principe

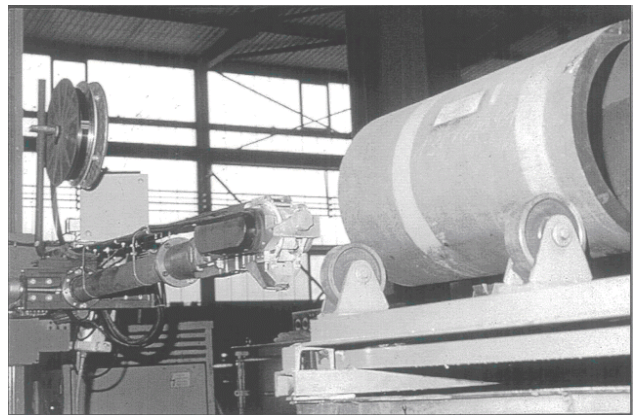
Meer informatie over dit onderwerp treft u aan op de website [www.coating-online.nl](http://www.coating-online.nl) onder het menu-item "Publicaties".

Bij dit proces wordt de benodigde warmte om de band tot smelten te brengen verkregen door de Ohmse weerstand van de gesmolten slak tussen het werkstuk en de elektrode. Er is geen boog (zie figuur 5.1). Het elektrolaklassen is dus in tegenstelling tot het elektro-gaslassen een weerstandsproces. Wat opvalt is dat het poeder alleen aan de voorzijde van de band wordt toegevoerd. De slakdikte boven de band bedraagt ongeveer 1 - 3 mm. Figuur 5.2 laat een opstelling zien van het elektrolaklassen met band.

De gemiddelde laagdikte die met elektrolaklassen met band wordt aangebracht ligt tussen de 3 en 5,5 mm.



figuur 5.1 Principeschema van elektrolaklassen met band



figuur 5.2 Opstelling van het elektrolaklassen met band

### Op te lassen materialen

Materialen die in één laag kunnen worden gelast zijn bijvoorbeeld: AISI 347 - 316L - 304L - 317L - 318 - duplex - 904L - 825 (4½ mm dikte voor L-kwaliteit met een voortloopsnelheid van 20 cm/mm).

Deklagen die doorgaans in twee lagen worden opgelast zijn bijvoorbeeld: Superduplex - ureumkwaliteit - Stellite CC6 - CC21 - CC258 - Hastelloy - legeringen op nikkel-basis.

De lasprocedures zijn geschikt voor hoge of lage snelheid (2 soorten). De voortloopsnelheid is de grote variabele. Voor werkstukken die na het oplassen een warmtebehandeling moeten ondergaan, zijn met stikstof gelegerde lasbanden beschikbaar.

### Voor- en nadelen van het elektrolaklassen met band

De voor- en nadelen van het elektrolaklassen met band worden in tabel 5.4 genoemd.

tabel 5.3 Karakteristieken van de verschillende lastechnieken voor het aanbrengen van deklagen

proces	lascode	vermengingspercentage (%)	hoeveelheid neersmelt (kg/uur)	laagdikte (mm)	breedte van de rups (mm)	neersmeltrendement (%)	hechting
MAG	135	10 - 40	1 - 7	2 - 5	3 - 8	90 - 95	goed
TIG	141	10 - 20	0,5 - 2	2 - 3	2 - 4	98 - 100	goed
BmBE	111	10 - 20	1 - 10	3 - 5	4 - 8	60 - 70	goed
OP (band of elektrode)	121 - 122	30 - 60	5 - 15	3 - 10	6 - 20	80 - 90	goed
elektrolak (band)		7 - 20	5 - 20	3 - 8	30 - 180	90 - 95	goed
laser		5 - 10	0,5 - 3	0,1 - 2	0,1 - 2	85 - 97	erg goed
plasma	15	5 - 15	0,5 - 4	1 - 3	2 - 5	98 - 100	goed
PPAW		5 - 10	0,5 - 2,5	1 - 3	2 - 5	80	goed

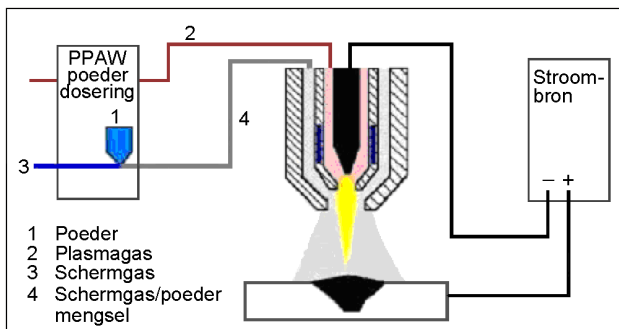
Bron: TNO Industrie en Techniek, Eindhoven

tabel 5.4 Voor- en nadelen van het elektrolaklassen met band

voordelen	nadelen
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ geringe inbranding en dus lagere opmenging</li> <li>➤ laag poederverbruik (0,6 à 0,8 kg/kg band)</li> <li>➤ mooi lasuiterlijk</li> <li>➤ gemakkelijke slaklossing</li> <li>➤ hoge neersmeltsnelheid/lasnelheid</li> <li>➤ hoge zuiverheidsgraad lasmetaal</li> <li>➤ laag zuurstofgehalte van het lasmetaal, wat zich vertaalt in hoge taaiheden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ minder bekend proces - conservatisme</li> <li>➤ beschikbaarheid geschikte lasbron (vermogen - karakteristiek)</li> <li>➤ beschikbaarheid bandlaskop</li> <li>➤ afmetingen/wanddikte werkstuk (warmte-afvoer)</li> <li>➤ moeilijke beheersbaarheid van het vloeibare smeltbad in de PA-positie</li> <li>➤ de magnetische blaaswerking tijdens het lassen. Vanaf 60 mm bandbreedte is magneetbesturing noodzakelijk, wat de beheersing van het proces moeilijker maakt (beheersing magnetische velden)</li> </ul>

### 5.1.3 PPAW, principe

Meer informatie over dit onderwerp treft u aan op de website [www.coating-online.nl](http://www.coating-online.nl) (menu-item "Publicaties"). Het Poeder Plasma lassen (PPAW: *Powder Plasma Arc Welding*) is recent op de markt gekomen als een variant van het plasmalassen en lijkt een concurrent te worden van zowel het conventionele plasma- als het TIG-lassen. Het principe van het proces is weergegeven in figuur 5.3. Er wordt gelast met een normale ingesnoerde plasma-boog die wordt ontstoken door een hulpboog (pilot-boog). Het Poederplasmalassen onderscheidt zich van het conventionele plasmalassen, doordat in plaats van een koude lasdraad een poeder in het smeltbad wordt ingebracht. Dit poeder wordt aangevoerd door het beschermgas of door een extra poedergasstroom en in de lasboog tot smelten gebracht. Het poeder heeft derhalve dezelfde functie als een koude draadtoevoer bij het TIG-lassen of conventionele plasmalassen.



figuur 5.3 Principe van PPAW

### Op te lassen materialen

Alle metallische en cermeten die in poedervorm zijn te verkrijgen, zijn met PPAW op te lassen.

### Voor- en nadelen van het PPAW

In tabel 5.5 worden zowel de voor- als de nadelen van PPAW genoemd.

### 5.1.4 Toepassing voor Poeder Plasma oplassen

Bij het toepassen van poeder plasma oplassen geldt:

- aan te brengen laagdikte tussen de 0,5 en 3 mm
- de hechting is over het algemeen zeer goed;
- er worden bij het oplossen zeer dichte lagen verkregen;
- grootte van de op te lassen gebieden: het PPAW positioneert zich wat dit betreft tussen het MAG- en TIG-lassen aan de ene kant en het lasercladden aan de andere kant.

## 5.2 Lasercladden

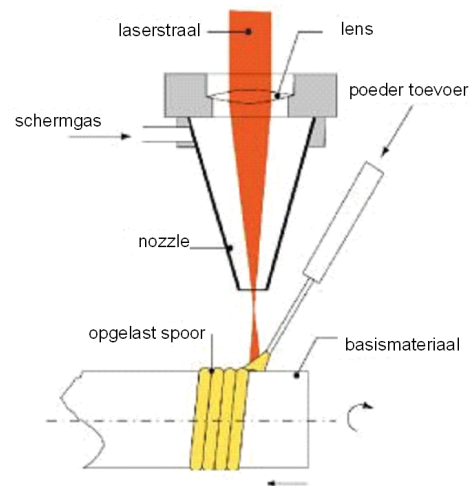
Lasercladden is het, met een gefocuseerde laserbundel als energiebron, aanbrengen van een deklaag met behulp van toevoegmateriaal. Lasercladden wordt daarbij

gekennzeichnet durch eine geringe opmenging tussen toevoegmateriaal en basismateriaal, waarbij beiden worden omgesmolten. Lasercladden wordt ook laseroplassen genoemd en in het Engels *lasercladding* of *laser overlay welding*.

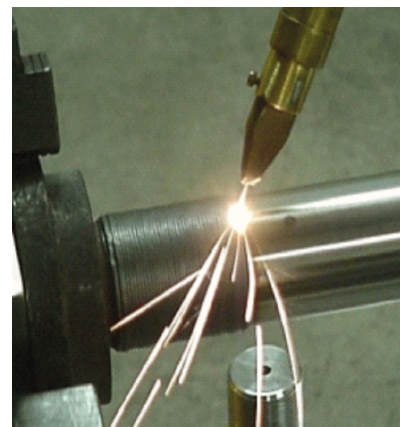
Het toevoegmateriaal kan op twee manieren worden toegevoegd:

1. In de vorm van poeder of draad. Dit is een één-stapsproces.
2. In de vorm van een vooraf aangebracht materiaal, bijvoorbeeld een galvanische of thermisch gespoten laag of een prepap van poeder in polymeer. Dit wordt een twee-stapsproces genoemd.

Een beschrijving van het lasercladproces kan worden gevonden in de FME/CWM publicaties TI-00-11 [8] en VM 121 [22]. Figuur 5.4 geeft een schematische weergave van het lasercladproces en figuur 5.5 de uitvoering.



figuur 5.4 Schematische voorstelling van het lasercladden



figuur 5.5 Lasercladden in uitvoering

tabel 5.5 Voor- en nadelen van het PPAW

voordelen	nadelen
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ lage warmte-inbreng</li> <li>➤ geringe inbranding en opmenging</li> <li>➤ apparatuur is ook voor standaard plasma (op)lassen inzetbaar</li> <li>➤ efficiënt op kleine oppervlakken (20 - 400 cm<sup>2</sup>)</li> <li>➤ hoge lassnelheid (2 - 5 maal TIG-lassen)</li> <li>➤ homogene chemische samenstelling van de laag (één laag is vaak voldoende voor gewenste samenstelling)</li> <li>➤ weinig insluitsels</li> <li>➤ inzetbaar als reparatieproces bij elektroslaklassen met band</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ dure apparatuur (de stroombron is tweemaal zo duur als een TIG-stroombron)</li> <li>➤ dure (reserve) onderdelen (toorts en slijtdelen)</li> <li>➤ dure toevoegmaterialen (onder andere door hoge kwaliteitseisen gesteld aan het poeder)</li> <li>➤ niet alle materialen zijn in poedervorm verkrijgbaar</li> </ul>

Naast lasercladden kunnen nog de volgende laserbewerkingen van het oppervlak worden onderscheiden:

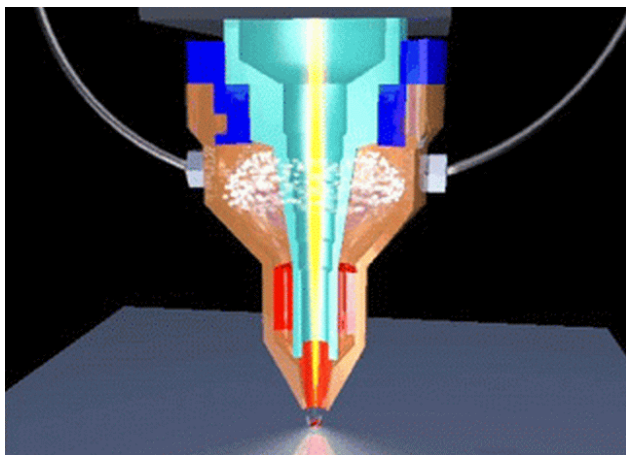
- ▶ laserlegeren: toevoegmateriaal met aanzienlijk deel van het basismateriaal omsmelten tot een homogene legering.
- ▶ laserdispergeren: toevoegmateriaal bevat uitsluitend of voor een groot deel niet-smeltende deeltjes, die zich homogeen verdeeld in de gesmolten laag bevinden.
- ▶ vormen van rapid proto-typing kunnen ook door lasercladden tot stand worden gebracht door vormgeving met laagsgewijze neersmelten of driedimensionaal neersmelten.

Deze laserbewerkingstechnieken zullen in deze publicatie niet verder worden behandeld. Hiervoor wordt verwezen naar de publicatie PA.02.13 [3].

### 5.2.1 Uitvoering lasercladden

Bij het één-stapsproces wordt de laserbundel tezamen met het toevoegmateriaal op het te cladden oppervlak gericht. Naast spotgrootte, vermogen en voortloopsnelheid is het poederdebiet van belang. Grotere te cladden oppervlakken komen tot stand door naastliggende sporen met een in te stellen overlap aan te brengen.

De meest gebruikelijke uitvoering is een laserkop met een zogenaamde coaxiale nozzle (figuur 5.6). De laserbundel valt door de centrale boring op het werkstuk en het poeder wordt ringvormig hier omheen toegevoerd. Eventueel kan dit met nog een extra ringvormige opening voor beschermgas en/of de poederstroom worden gecombineerd om een en ander goed gericht te houden. De toevoer van het toevoegmateriaal kan ook naast de laserbundel plaatsvinden. Dan wordt gesproken van een laterale uitvoering.



figuur 5.6 Schematische voorstelling van een coaxiale nozzle bij lasercladden

Bij het twee-stapsproces wordt het op te smelten materiaal vooraf aangebracht en moet vervolgens met lasercondities (spotgrootte, vermogen en voortloopsnelheid) worden gewerkt, zodat het aangebrachte materiaal tezamen met het basismateriaal tot een gecontroleerde diepte wordt omgesmolten.

Alle laserbronnen met voldoende vermogen (van  $10^4$  tot  $10^5$  W/cm<sup>2</sup>) zijn geschikt voor lasercladden mits gecontroleerd smelten tot stand kan worden gebracht. Dit is mogelijk met een continue bundel en een gepulste bundel met pulstijden van minimaal 3 ms. Laserbronnen die momenteel worden gebruikt, zijn:

- ▶ CO<sub>2</sub>-lasers,
- ▶ Nd:YAG-lasers
- ▶ diodelasers

Voor lasercladden worden momenteel meestal Nd:YAG-

en hoogvermogen diodelasers ingezet. In vergelijking met CO<sub>2</sub>-lasers hebben diodelasers hogere neersmelt-snelheden, een lager poederverbruik en een hogere efficiëntie.

De keuze voor een bepaalde laserbron wordt ingegeven door andere aspecten zoals:

- ▶ Afmetingen van het te cladden oppervlak. Diode-lasers hebben een hoog vermogen en een grote spot en kunnen daardoor relatief grote oppervlakken snel van een deklaag voorzien.
- ▶ Gewenste laagdikten in relatie tot het economisch gezien effectief aanbrengen. Een laagdikte van 50-200 µm kan bijvoorbeeld met een 500W Nd:YAG- of diodelaser met een snelheid van 100 mm/s worden aangebracht.
- ▶ Inwendige afmetingen. Niet alle laserbronnen zijn even geschikt voor transport door bijvoorbeeld een glasvezel, wat voor inwendig cladden nodig kan zijn. CO<sub>2</sub>-laserstralen zijn bijvoorbeeld niet geschikt voor transport door een glasvezel vanwege de golfengte.

### 5.2.2 Functionele eigenschappen van een lasercladlaag

De functionele eigenschappen van de cladlaag worden in sterke mate bepaald door de keuze van het toevoegmateriaal en de metallurgische verwerkbaarheid in combinatie met het basismateriaal:

- ▶ *Corrosievastheid*: roestvast staal, (super)duplex, Ni-basislegeringen, Ti-legeringen, CuNi-legeringen;
- ▶ *Slijtvastheid*: kobaltbasislegeringen, snelstaal, Ni-basislegeringen met WC, CuNi;
- ▶ *Warmvastheid*: roestvast staal, Ni-basislegeringen, kobaltbasislegeringen.

Zuiver keramische materialen als toevoegmateriaal zijn niet te verwerken door middel van lasercladden. Mengsels van keramische deeltjes met een metallische matrix (zogenaamde Cermets) zijn wel te verwerken.

### 5.2.3 Ontwerpaspecten voor een lasercladlaag

Ten opzichte van andere oplasprocessen is lasercladden een proces met relatief weinig warmte-inbreng met dientengevolge:

- ▶ een kleine warmte beïnvloede zone (veelal <0,5 mm);
- ▶ weinig vervorming;
- ▶ de mogelijkheid tot het oplassen van dunwandige producten en scherpe randen.
- ▶ zeer goede toegankelijkheid bij kleine boringen, zolang een line-of-sight te creëren is (zie ook figuur 5.7).

Door de relatief grote snelheid bij uitvoering en geringe spotafmetingen (1 - 5 mm) treedt snelle afkoeling op, resulterend in een fijne stolstructuur en, bij koolstofhoudende staalsoorten, relatief hoge hardheden. In deze zeer smalle zone in het basismateriaal (<0,5 mm) kunnen, afhankelijk van het basismateriaal, krimp-scheurtjes ontstaan. Dit kan invloed hebben op de vermoeiingseigenschappen.

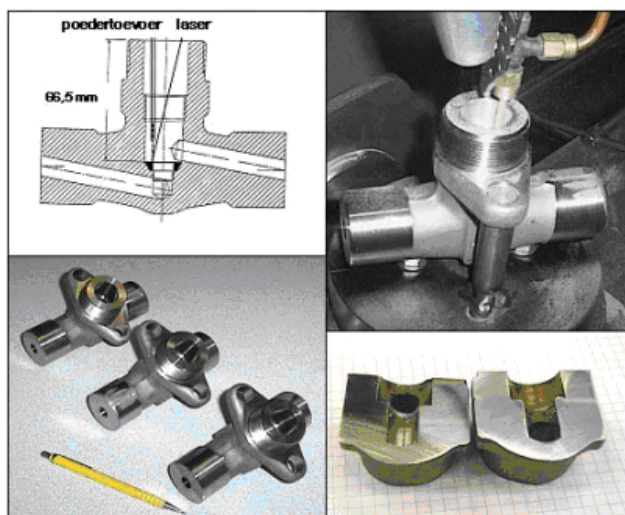
Hechting vindt plaats door middel van samensmelten met het basismateriaal. Daarbij ontstaat een dichte structuur zonder poriën. Eventueel kunnen kleine gasinsluitels (<10 µm) aanwezig zijn.

Lasercladden vraagt geen of een minimale voorbereiding en een geringe nabewerking.

Het proces wordt met NC-machines uitgevoerd, waardoor er een grote mate van reproduceerbaarheid is.

De kwaliteit van de laserbundel en de uitvoering van de laserkop bepalen de bereikbaarheid van de eventueel te cladden oppervlakken. Naarmate de kwaliteit van de laserbundel beter is en de omvang van de laserkop met materiaaltoevoer compacter, kunnen moeilijker toegankelijke oppervlakken worden geclad. In figuur 5.7 wordt een voorbeeld gegeven van inwendig lasercladden.





figuur 5.7 Inwendig lasercladden van een 1/2" plugafsluiter

De laagdikte, die kan worden aangebracht is afhankelijk van het beschikbare vermogen en de in te stellen parameters, maar kunnen variëren van minder dan 0,1 mm voor een kleine spot en geringe hoeveelheid toevoegmateriaal tot enige millimeters voor een grote spot, hoog vermogen en aangepaste hoeveelheid toevoegmateriaal. Eventueel kunnen meerdere lagen op elkaar worden aangebracht.

Lasergecladde oppervlakken dienen doorgaans te worden nabewerkt tot de gewenste eindmaat en oppervlakteruwheid. Dit betekent dat lasergecladde oppervlakken voor deze bewerkingen toegankelijk moeten zijn.

Voorbeeldproducten zijn:

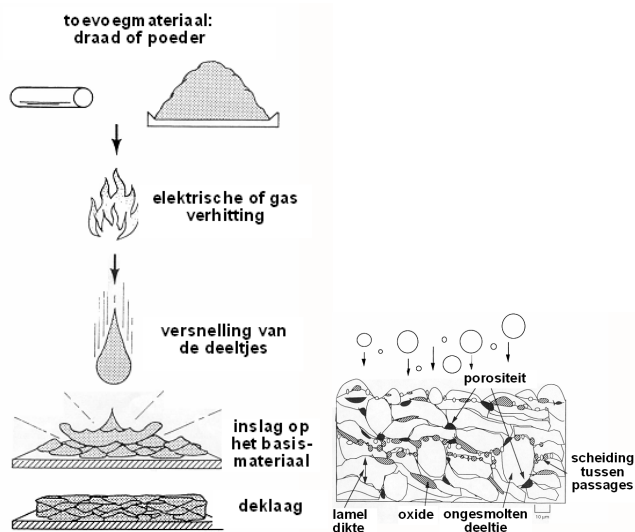
- ▶ spuitgietsgereedschappen;
- ▶ afsluiters;
- ▶ nokkenassen;
- ▶ krukassen;
- ▶ schroeven, extruders;
- ▶ pomponderdelen, impellers;
- ▶ stangen, cilinders, zuigers;
- ▶ hittebestendige lagen t.b.v. koleninjectoren, warmtewisselaars.

### 5.3 Thermisch spuiten, Principe

Bij het thermisch spuiten wordt een materiaal in de vorm van poeder of draad verwarmd en met een hoge snelheid

naar een object geblazen, waar het een deklaag kan vormen en het object eigenschappen geeft, die het van oorsprong niet had. Een groot voordeel is dat veel materialen (metallisch, keramisch en cermets) zijn te spuiten en poeders makkelijk te mengen zijn. Een veelheid aan materiaalcombinaties is mogelijk. Zie ook de publicaties VM 95 [4] en VM 108 [1] en de website [www.coating-online.nl](http://www.coating-online.nl).

In figuur 5.8 is een grafische voorstelling van een thermisch spuitproces weergegeven.



figuur 5.8 Schematische weergave van het thermisch spuitproces

#### 5.3.1 Korte omschrijving van diverse thermische spuitprocessen

Omdat het niet de doelstelling is in deze publicatie in te gaan op de details van de verschillende thermische spuitprocessen, wordt hiervoor verwezen naar bestaande publicaties VM 95 [4] en VM 108 [1] en andere open literatuur (zie ook de website [www.coating-online.nl](http://www.coating-online.nl)).

Op dit moment is er een breed scala aan thermische spuitprocessen, elk met zijn eigen kenmerken, beschikbaar (zie tabel 5.6). Er zijn diverse thermische spuitprocessen voorhanden, waarbij elk systeem zijn eigen (deklaag)-karakteristieken heeft. De processen zijn in drie hoofdgroepen in te delen, afhankelijk van hoe de thermische en kinetische energie wordt opgewekt. Om een goede

tabel 5.6 Karakteristieken van de verschillende thermische spuitprocessen

	brandstof + zuurstofmengsel					elektrisch + gas		elektrisch
	autogeen	HVOF	HP-HVOF	detonation gun <sup>1)</sup>	cold spray	plasma	vacuüm plasma	elektrisch draad
nominale vlamtemperatuur [°C]	3300	5200	5000	> 5200	350-800	18000	16000	4000
deeltjes temperatuur	2500	3300	3200	geen gegevens bekend		> 3800		> 3800
nominale deeltjes-snelheid [m/s]	50-200	200-1000	> 1200	800-900	550-1000	200-800	900	50-200
spuitafstand [mm]	ca. 200	150-200	250-350	??	10-50	50-150	30	80
porositeit [%]	10-20	< 2	< 0,5	0,1-1	< 0,1	5-10	< 5	10-15
hechtsterkte [MPa] <sup>2)</sup>	20-28	> 68	40-96	> 175	> 175	< 70	> 70	10-40
spuitcapaciteit [kg/h]	1-10	2-8	2-8	3-6	6-8	4-8	4-8	8-60
oxide	10-15				< 1	20-70	0	10-20
min/inw/dia-lengte [mm]	niet	180-610	180-160	niet	niet	60-650	60-650	100-900

1) Het Detonation Gun (DG) proces is gepatenteerd en wordt door een bedrijf in Amerika uitgevoerd. De apparatuur is niet op de vrije markt te koop  
2) 1 MPa = 1 N/mm<sup>2</sup>



hechting van de deklaag te krijgen, dient de som van thermische energie en kinetische energie voldoende te zijn. Zo zal bij het ene systeem minder thermische en meer kinetische energie voorhanden zijn en bij een ander systeem andersom. Met voldoende wordt hier bedoeld dat een deeltje op het moment van impact op het basismateriaal plastisch is, zodat het kan vervormen.

Een nadere omschrijving van de diverse thermische spuitsystemen wordt gegeven in VM 95 "Thermisch spuiten"[4] en VM 108 "Corrosiebestendige en slijt-vaste oppervlaktelagen" [1].

HVOF/HVAF draadspuiten en het cold spray proces zijn recent verder ontwikkeld en worden daarom meer in detail besproken.

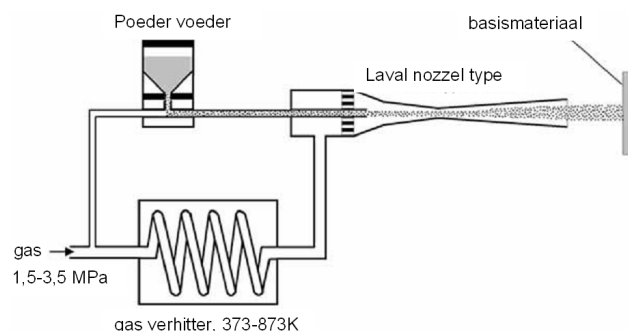
### HVAF draadspuiten

HVAF (High Velocity Air Fuel) draadspuiten is een techniek die de voordelen van 2 spuittechnieken samenvoegt: flexibiliteit en productiviteit van draadspuiten en porositeit en gasdoorlaatbaarheid van het HVOF-sputproces. Om oxidatie van de deeltjes te voorkomen, wordt er een overvloed aan brandstofgas zoals bijvoorbeeld propaan toegevoerd, waardoor het oxidatiepercentage lager is dan conventioneel draadgespoten deklagen. Deze techniek is met name geschikt voor deklagen van aluminium, op nikkel gebaseerde corrosiebestendige legeringen en Fe-Cr-B-C gevulde draden.

### Cold spray proces

Het proces is schematisch weergegeven in figuur 5.9. Het cold spray-proces is een relatief nieuwe techniek, die de laatste jaren een snelle ontwikkeling doormaakt. Bij koud spuiten wordt minder thermische en meer kinetische energie toegepast. De deeltjessnelheid ligt tussen de 500-900 m/s.

Met deze spuittechniek kan men ten opzichte van andere spuittechnieken dikkere lagen aanbrengen, die nog minder poreus zijn en een nog lagere oxidatie bevatten. Door de lagere thermische en hogere kinetische energie zijn er bepaalde beperkingen met betrekking tot het materiaal wat verspuutbaar is. Voorwaarde voor een materiaal om met Cold spray te verspuiten is, dat deze bij impact op het basismateriaal plastisch gedrag vertonen. Het proces is goed geschikt om zuivere metalen (Cu, Al, Zn, Ag, Ti, Ni) of legeringen (INC625, IN718, Hastelloy, RVS) te verspuiten. Voor het verspuiten van composieten, zoals cermets (carbide mengsels) of deklagen met een hoge hardheid, heeft het zijn beperkingen als gevolg van erosieverschijnselen op het basismateriaal en/of hoge spanningen in de opgespoten laag. Dit leidt voor dit type lagen tot beperkingen in de aan te brengen laagdikten. Volledig keramische materialen zijn niet met het cold spray proces te verspuiten.



figuur 5.9 Principe van cold spray

### Toepassingen van Cold spray

Cold spray is een nog nieuwe in ontwikkeling zijnde techniek, waardoor er weinig industriële toepassingen zijn, maar deze zijn sterk in ontwikkeling en groeiend. De aandacht gaat voornamelijk uit naar het produceren van relatief dunne, zeer dichte en oxidevrije lagen. Voor de hand liggende toepassingen vindt men in de ruimtevaart, automobiel- en elektronische (elektrische/warmte geleiders) industrie. Ontwikkelingen zijn gaande op het gebied van MCrAlY's (luchtvaart/gas turbines), Cu voor heat capacitors, enz.

Toepassingen zijn niet te vinden in de bescherming tegen slijtage, maar vooral in de richting van corrosie/oxidatie, en voor elektrische/warmte geleiding.

### 5.3.2 Functionele eigenschappen thermisch gespoten deklaag

Bijna alle materialen zijn te spuiten en de belangrijkste toepassingsgebieden van thermisch gespoten deklagen zijn:

- bescherming tegen corrosie (bijvoorbeeld: RVS, Al, Zn, Ni-Cr-legeringen);
- bescherming tegen slijtage (bijvoorbeeld: WC-Co,  $\text{Cr}_2\text{C}_3$ ):
  - abrasieve slijtage (harde deeltjes tussen twee oppervlakken);
  - adhesieve slijtage (twee metaalvlakken glijden over elkaar);
  - vermoeiingsslijtage (terugkerende druk en schuifspanningen);
  - erosieve slijtage (deeltjes in een stroom gas of vloeistof);
- slijtgewillige laag (bijvoorbeeld: Nikkel-grafiet composit);
- reparatie van beschadigde onderdelen (materiaal afhankelijk van onderdeel);
- elektrische isolatie (bijvoorbeeld  $\text{Al}_2\text{O}_3$ );
- thermische isolatie (bijvoorbeeld  $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ );
- smering (molybdeen);
- esthetisch (bijvoorbeeld een koperlaag op hout);
- ....

Zie de selectie tabellen voor een uitgebreid overzicht van materialen en hun toepassingen.

### 5.3.3 Ontwerpaspecten bij het thermisch spuiten

Er zijn beperkingen met betrekking tot het aanbrengen van deklagen en de grootte of invloed is afhankelijk van het toegepaste spuitsysteem.

De belangrijkste beperkingen zijn:

- *Minimale inwendige afmetingen (bijvoorbeeld kleine boringen)*

De toegankelijkheid is afhankelijk van de grootte van het pistool en hoe diep men bijvoorbeeld in een buis wil spuiten. Verder bestaan er voor enkele spuitsystemen extensies (verlengstukken) voor het pistool, waardoor men in kleine diameters kan spuiten. APS systemen hebben over het algemeen een korte spuitafstand, in orde grootte van 20-30 mm. Deze systemen zijn daarom zeer geschikt om in kleine diameters te spuiten. HVOF systemen hebben veel grotere spuitafstanden, in de orde grootte van 200 mm. Deze systemen zijn daardoor minder geschikt voor inwendig spuiten.

Zo kan men bijvoorbeeld met HVOF binnendiameters spuiten vanaf 180 mm of groter en met plasma binnendiameters vanaf 30 mm. Een diepte van ongeveer 600 mm is bereikbaar. Voor HVOF zijn ontwikkelingen gaande, waarbij het mogelijk wordt inwendig in diameters vanaf 80 mm te spuiten.

#### ► Dikte basismateriaal

In dunne substraten (afhankelijk van het basismateriaal, dikte ongeveer 2 mm en dunner) zullen snel mechanische spanningen ontstaan, die ervoor zorgen dat de dunne substraten kromtrekken. Deze spanningen ontstaan tijdens de voorbereiding en het spuiten. Tijdens het voorbereiden wordt het basismateriaal gereinigd en ruw gemaakt. Het ruw maken gebeurt veelal door gritten, waardoor het basismateriaal kromtrekt als gevolg van drukspanningen die in het basismateriaal worden gebracht tijdens het gritstralen. Tijdens het spuitproces worden de poederdeeltjes met een zekere thermische en kinetische energie naar het basismateriaal geblazen. De thermische en kinetische energie van de deeltjes zorgen voor spanningen in het basismateriaal. Deels als gevolg van de impact (met name bij keramische materialen en cermets) en deels door thermische spanningen als gevolg van krimp van de deeltjes.

#### ► Dikte deklaag

Een beperking qua dikte van de deklaag is vooral te vinden bij het gebruik van keramische poeders. Metallische deklaagen kunnen tot enkele millimeters dikte worden gespoten en men maakt keramische deklaagen veelal niet dikker dan ongeveer 200 µm.

#### ► Hechting op het basismateriaal

Bij het thermisch spuiten is het belangrijk dat het basismateriaal een goede voorbehandeling krijgt om een goede hechting te garanderen. De hechtsterkte zal uiteraard niet zo hoog zijn als het basismateriaal. In de praktijk blijkt echter dat de hechtsterkte voor de meeste toepassingen voldoende is.

#### ► Verschil in uitzettingscoëfficiënt tussen basismateriaal en deklaag

Door een verschil in uitzettingscoëfficiënt kan er delaminatie ontstaan. Dit kan worden voorkomen door een tussenlaag aan te brengen met een uitzettingscoëfficiënt die tussen die van het basismateriaal en de toplaag in ligt, waardoor de spanningen gelijkmatiger over de dikte worden verdeeld.

#### ► Geometrie

Scherpe overgangen, randen en groeven kunnen ervoor zorgen dat de deklaag niet goed hecht en de dikte niet uniform is. Zie tabel 5.7 voor een overzicht.

#### ► Porositeit

Afhankelijk van het spuitsysteem en gebruikte poeder zal de porositeit ongeveer tussen de 1 en 20% liggen. Dit is zoals gezegd onder andere afhankelijk van de verhouding in thermische en kinetische energie van de opgespoten deeltjes op het moment dat deze op het oppervlak komen.


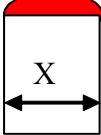
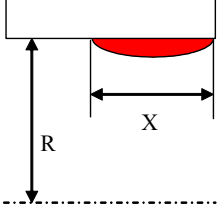
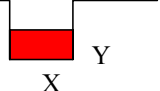
De hoogste porositeit krijgt men bij het draadspuiten, terwijl men bij het spuiten met hoge snelheden (zoals bijvoorbeeld het HVOF, HP-HVOF en het 'cold spray' proces) onder de 1% komt.

Afhankelijk van de toepassing kan een hoge porositeit gewenst zijn, want:

- porositeit heeft een gunstige invloed op de eigenschappen van een deklaag ter bescherming tegen hoge temperatuur, porositeiten tot 40% zijn daarbij gebruikelijk.
- bij slijtage kunnen de poriën als reservoir dienen voor een smeermiddel.
- spanningsverschillen tussen basismateriaal en deklaag kunnen beter worden overbrugd.

Als porositeit van de deklaag niet is toegestaan, kunnen insmeltlegeringen worden toegepast. Dit zijn doorgaans legeringen met een hoog silicium- en/of boor-gehalte. Na of tijdens het spuiten wordt de deklaag met een brander tot aan het smeltpunt verhit. Doorgaans

tabel 5.7 Thermisch spuiten, richtlijnen aangaande de vorm en geometrie van op te spuiten materialen

configuratie		afmetingen (mm)	beperkingen
platen			geen
randen			$X > 6$
pijpen (inw.)		$R > 100$ $5 < R < 100$ $5 < R < 50$	$X < 2R$ $X < 6R$ $X < 0,6R$
groeven		$X > 6$ $X < 3$	$Y < 0,6X$ onmogelijk

tot temperaturen boven de 900 °C. Nadeel hiervan is dat hierbij ook het basismateriaal wordt verhit en andere eigenschappen kan krijgen.

#### ► Insmelten van thermisch gespoten deklaagen

Indien porositeit ongewenst is of de hechtsterkte van een thermisch gespoten deklaag niet voldoet, kan de deklaag aan een aanvullende thermische behandeling worden onderworpen. Het werkstuk wordt met een geschikte warmtebron verhit tot een temperatuur (950 - 1200 °C), waarbij in de deklaag gedeeltelijk smeltverschijnselen ontstaan. Poriën worden zo dicht gesmolten en door diffusie-effecten wordt de hechting op het basismateriaal (substraat) sterk verbeterd. Deze komt tussen de hechtsterkte van opspuiten zonder insmelten en die van oplassen in te liggen. De voordelen van geen opmenging met het substraat blijven gehandhaafd. Voorwaarde is wel dat de substraatmaterialen bestand zijn tegen de hoge temperatuur. Insmelten van thermisch gespoten deklaagen is een aparte en aanvullende techniek, waarmee de eigenschappen van de deklaag naar de geëiste functionaliteit kunnen worden geoptimaliseerd.

#### ► De combinatie van een harde deklaag en een relatief zacht basismateriaal

Deze dient onder bepaalde omstandigheden te worden vermeden. Bij zware puntbelastingen en lijnbelasting moet men oppassen dat het basismateriaal niet veel zachter is dan de deklaag, omdat dit negatieve gevolgen kan hebben voor de deklaag. Onder de drukbelasting zal het basismateriaal vervormen. Als de deklaag deze vervorming niet kan volgen, zal deze gaan scheuren. Dit staat bekend als het eierschaaleffect.

Thermisch spuiten is een zogenaamde line-of-sight techniek. Dat betekent dat alleen oppervlakken die niet zijn afgeschermd van een deklaag kunnen worden voorzien. Daarbij worden de beste deklaagen verkregen als de hoek tussen het werkstuk en het spuitpistool 90° is. Afhankelijk van het spuitsysteem kan deze hoek binnen zekere grenzen variëren zonder significante veranderingen in de functionele deklaageigenschappen. De ontwerper dient hiermee rekening te houden.

### 5.3.4 Toepassingsvoorbeelden

#### Corrosie:

Boorplatforms, opslagtanks, sluizen, gasflessen.

#### Hoge temperaturen:

Onderdelen turbinemotoren, zuiger.

#### Slijtage:

Roerwerken, geleiderollen, inktrollen, transportschroeven.

#### Slijtwillige laag:

In een gasturbine moet de speling tussen de tip van een schoep en de behuizing minimaal zijn om te zorgen voor een goede afdichting. Als de speling te klein is kan de behuizing beschadigen. Door een slijtwillige laag aan de binnenzijde van de behuizing aan te brengen kunnen de schoepen niet beschadigen, zal de speling minimaal zijn en voor een goede afdichting zorgen.

#### Reparatie:

Roerwerken, assen.

#### Elektrische isolatie:

Onderdelen in elektrische behuizingen.

#### Smearing:

Onderdelen van een automotor.

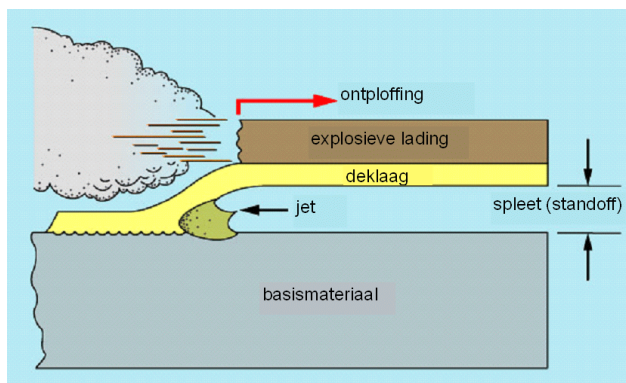
### 5.4 Explosief cladde

Het explosief cladproces is een bekledingsproces voor metalen dat al meer dan veertig jaar commercieel wordt toegepast door gespecialiseerde bedrijven. Het wordt door specialistische bedrijven op een grote schaal (tot 40 m<sup>2</sup> tegelijk) uitgevoerd. Het explosief cladproces heeft de volgende kenmerken:

- ▶ uitvoering bij kamertemperatuur, daardoor geen warmte-inbreng of warmte beïnvloedde zone (WBZ);
- ▶ metalen blijven in hun vaste fase en microstructuur van de basismaterialen wordt niet beïnvloed;
- ▶ geen opmenging, diffusie of smeltfase (geen stollingskrimp);
- ▶ mogelijkheid tot verbinden van ongelijksoortige metalen;
- ▶ geen vorming van brose intermetallische verbindingen tijdens het fabricageproces.

#### 5.4.1 Het explosief cladproces, principe

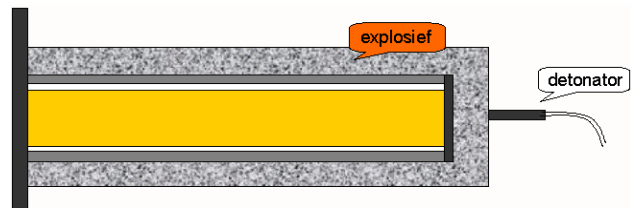
Het explosief cladde van metaalplaten wordt uitgevoerd door middel van een parallelle opstelling van op elkaar te verbinden platen die net iets boven elkaar worden geplaatst. De spleet (standoff) ertussen bepaalt de versnelweg van de bovenste (cladlaag), aangezien deze laatste door het detoneren van een erboven geplaatste springstoflaag wordt versneld (zie figuur 5.10).



figuur 5.10 Schematische voorstelling van het explosief cladproces (bron: TNO Defensie en Veiligheid)

Voor het bekleden van een staaf of buisvorm kan het eenvoudigst van een cladmateriaal in de vorm van een

(dunwandige) buis gebruik worden gemaakt. Deze dient een zodanig afwijkende diameter te hebben, dat er een spleet (standoff) ontstaat met het te bekleden oppervlak van de te cladde buis of staf. De springstoflaag wordt tegen de te versnellen buis geplaatst (zie figuur 5.11), waarbij hetzelfde botsingsproces optreedt als in het geval van vlakke platen (zie figuur 5.10). Door een buis tijdelijk op te vullen met een medium wordt implosie tijdens het cladde voorkomen en kunnen op dezelfde wijze als stafmaterialen ook buizen zowel inwendig als uitwendig worden bekleden. Na het explosief cladde (waarbij de aan te brengen folielaag ook aan de binnenkant van de buis kan worden aangebracht) wordt het opvulmedium weer verwijderd en is de buis voorzien van een inwendige of externe bekleding.



figuur 5.11 Schematische weergave van de opstelling voor het explosief cladde van een metalen staaf (bron: TNO Defensie en Veiligheid)

Het explosief cladde kan zowel onder atmosferische condities, als onder vacuüm worden uitgevoerd. Daarbij wordt bij explosief cladde onder vacuüm een kwalitatief betere deklaag verkregen in termen van dichtheid, insluitels, porositeit, taaiheid, procesbeheersing en latere verwerking zoals zagen en snijden. Er worden dikke deklagen veelal op staalplaat aangebracht ten behoeve van de procesindustrie (deklagen van zeer corrosievaste metalen als titanium en zirkonium). Hierbij kan de sterkte van de constructie door het goedkopere staal worden geleverd, terwijl het gebruik van het dure deklaagmateriaal is beperkt. Van de bimetaal platen worden vervolgens ketelbodems en -wanden vervaardigd, die in raffinaderijen en diverse andere onderdelen van de chemische procesindustrie worden gebruikt.

Door de botsing van de platen met een hoge snelheid (circa 300 m/s) onder een constante trefhoek (ca 10°) ontstaat een extreem hoge druk in en rondom het botsingspunt.

Onder de juiste condities (onder andere dient de snelheid van het botsingspunt beneden de geluidssnelheid in de metalen te zijn) ontstaat er een effect dat "jetting" wordt genoemd. Hierbij reageren de metalen in het botsingsgebied op een hydrodynamische wijze ("als een vloeistof") en sproeit er een kleine fractie metaal, afkomstig van de botsende metaaloppervlakken, vóór het botsingspunt uit. Dit jetting-effect is een noodzakelijke voorwaarde voor het explosief bekleden van metalen, aangezien hierdoor de oppervlakken van de botsende metalen worden verwijderd, inclusief de oxidehuid en mogelijk andere aanwezige verontreinigingen. Dergelijke lagen verhinderen normaler wijze het noodzakelijke pure metaal-metaal contact voor een metaalbinding. Door het zelfreinigende effect van de jet is het vooraf reinigen van de te verbinden metaaloppervlakken eenvoudig (licht opschuren en ontvetten) en is dit soms zelfs niet nodig.

#### 5.4.2 Explosief te cladde materialen en materiaalcombinaties

Met explosief cladde kan een grote variatie aan materiaalcombinaties aan elkaar worden verbonden, zie figuur 5.12. Het belangrijkste criterium is dat de materialen minimaal een plastische vervorming van 10% kunnen opnemen. Daarmee is de techniek beperkt tot metallische materialen en materiaalcombinaties.



deklaag	roestvast staal nikkel	duplex nikkellegeringen	titaan aluminium	zirkoon koper	tantaal koperlegeringen	Al-brons
basismateriaal	koolstofstaal	roestvast staal	gelegeerd staal	koper	koper	aluminium

figuur 5.12 Voorbeelden van mogelijke materiaalcombinaties met explosief cladden (internetsite smt)

### 5.4.3 Ontwerpaspecten bij explosief cladden

Bij het explosief cladden is het van belang rekening te houden met de volgende aspecten:

- ▶ dat er een voldoende grote standoff mogelijk is tussen het basismateriaal en de cladlaag (richtlijn is een standoff afstand gelijk aan de dikte van de cladlaag);
- ▶ vlakheid: te verbinden oppervlakken hoeven niet geheel vlak te zijn. De standoff mag als gevolg van onvlakheid niet meer dan 50% variëren;
- ▶ deklaagdikten van 0,1 tot 30 mm zijn te realiseren (ondergrens is 0,075 mm);
- ▶ economie: vanuit economisch oogpunt is de optie van een dikkere cladlaag op een dikker basismateriaal aan te brengen te overwegen. Na het cladden kan de gecladde plaat door walsen en/of trekken op de gewenste dikte worden gebracht (dit is mogelijk dankzij de hoge hechtsterkte);
- ▶ maximaal te cladden oppervlak: tot 40 m<sup>2</sup> is standaard met explosief cladden mogelijk;
- ▶ voorbereiding: meestal volstaat opschuren (verwijderen van de oxidehuid);
- ▶ explosief cladden is een handmatig batch proces;
- ▶ plastische vervorming materialen: een minimale rek van 10% is vereist. Zachte (onlegeerde) metalen zijn doorgaans eenvoudiger toe te passen dan de sterkere legeringen;
- ▶ nabewerking: mogelijke nabewerking zijn lassen, snijden, zagen, frezen, enz. Dit kan invloed hebben op de keuze voor explosief cladden onder atmosferische condities of onder vacuüm;
- ▶ doorgaans niet geschikt als eindproduct, maar wordt als halffabrikaat toegepast;
- ▶ restspanningen in het explosief gecladde product kunnen bij verhoogde temperatuur relaxeren en een vervorming van het product veroorzaken. Bij halffabrikaten is dit doorgaans geen probleem;
- ▶ niet geschikt als reparatiemethode;
- ▶ kan niet op locatie worden uitgevoerd (in verband met geluid en explosieven).

### 5.4.4 Voor- en nadelen van explosief cladden

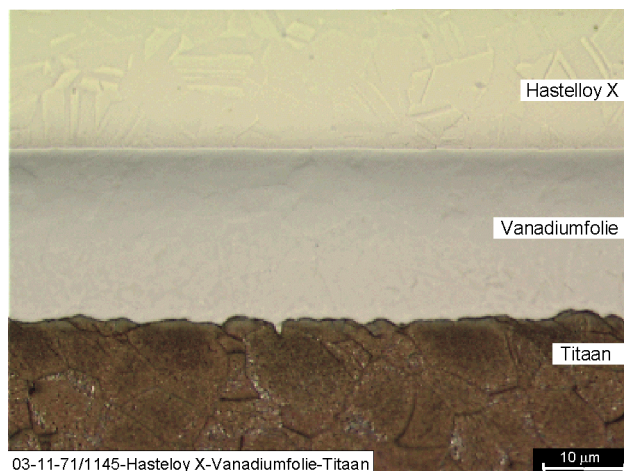
Voordelen en nadelen van het explosief cladden staan samengevat in tabel 5.8.

### 5.4.5 Voorbeelden van explosief cladden

#### Dikke lagen gemaakt met explosief cladden

Explosief cladden wordt veel toegepast in onder andere de scheepsbouw. De toepassing spitst zich hier toe op:

- ▶ corrosiebescherming van staal door het aanbrengen van een corrosiebestendige AlMg legering. Een veel gebruikte legering is AlMg4,5Mn. Wat betreft applicatie is hier een vergelijking te trekken met de toepassing van thermisch gespoten aluminiumlagen (D. Ros, december 2004).
- ▶ het aanbrengen van een overgangslaag voor het verbinden (lassen) van de aluminium bovenbouw aan het dek. Commercieel verkrijgbare producten worden verkocht onder de geregistreerde handelsnamen Triclad en Triplate.



figuur 5.13 Bekleding van titanium plaat met een folie van een nikkel-legering (Hastelloy X) met een Vanadium tussenlaag als diffusiebarrière die de vorming van brosse TiNi-fasen tegengaat

Voor de scheepsbouw worden overgangstrips vervaardigd, waardoor het mogelijk is een corrosievaste verbinding tussen de stalen romp en de opbouw van aluminium te verkrijgen. Hiertoe worden 20 mm dikke platen

tabel 5.8 Voor en nadelen van explosief cladden

voordelen	nadelen/beperkingen
<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ <b>Optimale microstructuur:</b> Doordat bij explosief cladden de deklaag bestaat uit plaatmateriaal (of buis) en de microstructuur door het cladden niet wordt veranderd, zijn de deklagen altijd vrij van porositeit en hebben een gedefinieerde (geoptimaliseerde) microstructuur.</li> <li>▶ <b>Hechting:</b> De hechting tussen de deklaag en het basismateriaal is bijzonder sterk, er worden dan ook minimum hechtingssterkten gegarandeerd. Deze is dan ook te bepalen door o.a. buig-, afschuif- en trekproeven (bij deklagen &gt; 2 mm. Standaard worden de verbindingen niet-destructief onderzocht (NDO) via ultrasoon testen op onthechting. Door de goede hechting en ductiliteit van de gebruikte metalen wordt dit cladproces veelal toegepast voor de vervaardiging van halffabrikaten. Hierdoor kunnen eenvoudige vormen (vlakke of enkel gekromde oppervlakken) worden bekleed, waarop nadien nog omvormprocessen en verspanende technieken kunnen worden uitgevoerd.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ <b>Toepassingstemperatuur:</b> Deze kan gemaximaliseerd zijn, doordat boven bepaalde temperaturen als gevolg van diffusieprocessen intermetallische verbindingen gevormd kunnen worden. Bij explosief cladden van aluminium op staal is dit ca. 315 °C. Boven deze temperatuur bestaat het gevaar voor de vorming van brosse intermetallische AlFe<sub>3</sub> fasen. Bij het lassen moet met deze effecten rekening worden gehouden. Met een tussenlaag als diffusiebarrière kunnen deze temperatuurbependingen van gecladde metalen worden opgeheven (zie figuur 5.13).</li> <li>▶ <b>Afmetingen:</b> Onder atmosferische condities zijn oppervlakken tot 40 m<sup>2</sup> standaard. Bij het explosief cladden in vacuüm zijn de afmetingen beperkt tot die van de vacuümkamer. Hier zijn afmetingen tot 25 m<sup>2</sup> mogelijk.</li> <li>▶ <b>Vorm:</b> Over het algemeen is de vorm beperkt tot vlakke platen en licht gekromde oppervlakken. Met explosief cladden worden daarom doorgaans alleen halffabrikaten gemaakt. De uitstekende hechting tussen de lagen maakt nadere bewerkingen zoals plastisch omvormen en lassen goed mogelijk.</li> </ul>

van staal 52 bekleed met een corrosievaste aluminiumlegering (AlMg4,5Mn, AA5083) met een tussenlaag van puur aluminium (AA1050). Na het cladden van 3 à 4 meter lange platen, worden hiervan diverse strips gezaagd. De strips worden onder de naam Triclad (Nobel-clad) en Triplate (SMT) verkocht. Mits rekening wordt gehouden met de maximale temperatuur van de Al-Staal overgang van circa 315 °C, kunnen deze strips via conventionele lasmethoden worden verbonden aan de stalen romp en de aluminium opbouw van het schip.

Door de puur metallische overgang over een geheel oppervlak van ongelijksoortige metalen heeft een explosieve verbinding de geringst denkbare overgangsweerstand voor elektriciteit en warmte. Hierdoor wordt deze deklaagtechniek ook toegepast voor aluminium-koper bus-bars welke bij grote stroomsterkten worden ingezet voor de productie van primair aluminium (elektrolyse). Door de grote stroomsterkte zal een te grote overgangsweerstand lokaal tot een te hoge temperatuur leiden met smelt en chemische reacties tussen Al en Cu (met nog grotere weerstand) tot gevolg.

#### **Dunne deklagen (folie cladden) met explosief cladden**

Behalve het bekleden van centimeters dikke metaalplaten, zoals uitgevoerd bij de commercieel opererende bedrijven, is het proces ook geschikt gebleken voor het aanbrengen van dunne plaatdelen en folies tot een dikte van circa 100 micrometer. Dit kan tevens worden uitgevoerd op (enkel) gekromde metaaloppervlakken zoals een externe en/of interne bekleding van een buis. In tegenstelling tot andere bekledingsmethoden is het aanbrengen van een 75 micrometer dik metaalfolie een ondergrens. Helaas wordt het explosief bekleden van folies (nog) niet bedrijfsmatig uitgevoerd.

Voor het cladden van een metaalfolie dient een bufferlaag tussen de springstof en de folie te worden gebruikt. Deze bufferlaag beschermt de folie en voorkomt dat deze gaat golven of wordt geperforeerd door de interactie met de gasvormige detonatieproducten die met een zeer hoge snelheid (circa 1000 m/s) over het oppervlak razen. Bij foliecladden is de cladlaag in figuur 5.10 dus opgebouwd uit een bufferlaag met daaronder de aan te brengen folie. Het aanbrengen kan eenvoudig met een lijmlaag of dubbelzijdig tape worden gedaan, hetgeen tevens voorkomt dat de folie aan de bufferlaag vastlast.

Op de website [www.coating-online.nl](http://www.coating-online.nl) (onder het menu-item "Publicaties") staan voorbeelden van explosief cladden nader uitgewerkt. De behandelde voorbeelden zijn:

- ▶ cladden van RVS 301 staaf met een elektrisch geleidende zilverlegering.
- ▶ wolframfolie op koper in verband de thermische belasting.
- ▶ tantaalbekleding van een koperen buis in relatie tot corrosieweerstand.
- ▶ RVS-folie op titaan 6.4 ter verhoging van de weerstand tegen fretting

### **5.5 Elektrochemische processen**

Een bekende aanduiding is 'galvanotechniek'. Met deze techniek wordt langs elektrochemisch weg een deklaag aangebracht op een basismateriaal. Voor dit proces is het dus van belang dat zowel het aan te brengen materiaal als het basismateriaal elektrisch geleidend zijn. Dit betekent, dat via elektrochemische weg alleen metallische deklagen zijn aan te brengen. Het basismateriaal daarentegen hoeft niet van zichzelf elektrisch geleidend te zijn. Met speciale voorbehandelingen is het mogelijk kunststoffen en keramiek van galvanisch aangebrachte deklagen te voorzien (VOM Vademecum).

De metallische deklaag wordt aangebracht vanuit een elektrolyt. Deze elektrolyt kan zowel een waterige oplossing, een niet-waterige oplossing als een zoutsmelt zijn.

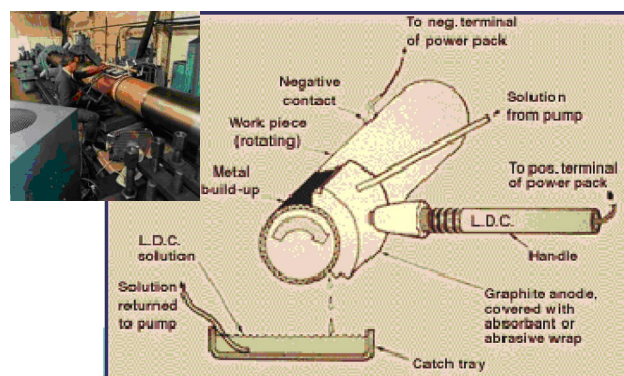
Waarvoor wordt gekozen, hangt af van de aan te brengen deklaag. In principe kan elk metaal dat in een elektrolyt is op te lossen, worden aangebracht. Ook legeringen of composietdeklagen zijn mogelijk.

Zeer veel toegepaste deklagen zijn chroom of een combinatie van nikkel en chroom. Enkel chroom wordt veel gebruikt op machineonderdelen, maar zodra elektrochemische corrosie kan optreden, wordt nikkel-chroom gebruikt. Op hydraulische zuigerstangen wordt nikkel-chroom veelvuldig toegepast, vaak in de min of meer standaard laagdiktecombinatie 60 µm nikkel en 40 µm chroom.

De elektrolyt bevindt zich doorgaans in een bad, waarin het product dat van een deklaag moet worden voorzien wordt geplaatst. Dit geeft beperkingen aan de productafmetingen.

Een alternatief is het zogenaamde 'tampongalvaniseren'. Daarbij wordt een poreus materiaal verzadigd met elektrolyt en op het werkstuk geplaatst (zie figuur 5.14).

Daarbij bestaat er in principe geen beperking voor de afmetingen van het product. Ook kan deze techniek op locatie worden toegepast. Tampongalvaniseren is arbeidsintensief en wordt daarom vaak toegepast voor lokale behandelingen en reparaties, en is daarmee een aanvulling op het behandelen in een bad. Grote besparingen kunnen worden bereikt wanneer machineonderdelen niet hoeven te worden uitgebouwd.



figuur 5.14 Het principe van tampongalvaniseren (bron: Maasdijs Metaal)

In deze publicatie wordt niet nader ingegaan op de specifieke deklagen en daarmee gemoeide baden. Hiervoor wordt verwezen naar onder andere de VOM Vademecum en ASM Handbook Vol 5 Surface engineering [18]. Verder kan uiteraard informatie bij de galvanobedrijven worden ingewonnen. Adressen zijn onder andere via de VOM ([www.vom.nl](http://www.vom.nl)) verkrijgbaar en de branchevereniging NGO-SBG ([www.ngo-sbg.nl](http://www.ngo-sbg.nl)).

#### **5.5.1 Functionele eigenschappen**

Elektrochemisch aangebrachte deklagen vinden brede toepassing. Tabel 5.9 geeft een overzicht van de eigenschappen van elektrochemisch en stroomloos aangebrachte metallische deklagen.

Ook repareren is met galvanotechniek mogelijk. Voorbeelden zijn te vinden bij reparatie van gesleten machineonderdelen. Tampongalvaniseren is hiervoor uitermate geschikt, indien reparatie op locatie moet gebeuren in verband met stilstandskosten.

De laagdikte is met elektrolytisch aangebrachte deklagen tot op enkele micrometers nauwkeurig te bepalen. Met elektrolytisch aangebrachte deklagen zijn deklaagdicken tot enkele millimeters mogelijk.



tabel 5.9 Functionaliteit van elektrochemisch en stroomloos aangebrachte metallische deklayen

	Hardheid (HV)	Elektrisch geleidend vermogen	Soldeerbaarheid	Hechtingsondergrond	Corrosiebescherming	Zelfsmerend vermogen	Glijvermogen	Slijtvaastheid	Consumptief geschikt
Glansnikkel	200-300	●	●	●	●	●	●	●	●
Autokatalytisch Ni.	480-1000	●	●	●	●	●	●	●	●
Sierchrom		●	●	●	●	●	●	●	●
Hardchrom	900-1000	●	●	●	●	●	●	●	●
Zink (zwartgechr.)		●	●	●	●	●	●	●	●
Tin		●	●	●	●	●	●	●	●
Koper		●	●	●	●	●	●	●	●
Goud		●	●	●	●	●	●	●	●
Zilver	80-160	●	●	●	●	●	●	●	●
Geanodiseerd Al.	250-600	●	●	●	●	●	●	●	●
gechromateerd Al.		●	●	●	●	●	●	●	●
Gezwart staal		●	●	●	●	●	●	●	●
Zn-fosfateerlaag		●	●	●	●	●	●	●	●
Elektroforese lagen		●	●	●	●	●	●	●	●

De bolletjes geven de toepasbaarheid van de verschillende deklayen aan

## 5.5.2 Ontwerpaspecten

Bij het ontwerpen van producten, die voorzien moeten worden van een elektrolytisch aangebrachte deklay, moet rekening worden gehouden met de volgende aspecten:

### Geometrie

Scherpe randen en hoeken, bijna gesloten kraalranden, spitse punten, nauwe en blinde gaten, smalle gleuven en alle constructiedelen die kunnen vollopen of volzuigen en die niet door spoelen effectief gereinigd kunnen worden, moeten worden vermeden.

Scherpe randen en spitse punten leiden tot een lokaal hogere stroomdichtheid en daarmee tot een lokaal hogere depositiesnelheid en dus dikkere lagen. Dit kan nabewerken noodzakelijk maken en is daarmee kostenverhogend.

Voor het aanbrengen van een deklay moet het basismateriaal in 'zicht' van een elektrode kunnen worden geplaatst. In blinde gaten en nauwe openingen kunnen geen (hulp)elektroden worden geplaatst. Bij smalle sleuven kunnen de veldlijnen worden afgeschermd. Verder is het belangrijk dat de afstand tussen anode en kathode (meestal het werkstuk) over het product niet al te grote variaties vertoont. Hoe verder een oppervlak van de anode vandaan ligt, hoe groter de weerstand is van de vloeistofkolom op die plaats tussen werkstuk en anode en hoe lager de stroomdichtheid en daarmee de depositiesnelheid. Doorgaans is een zo hoog mogelijke stroomdichtheid gunstig voor een betere laagdikteverdeling; dus het plaatsen van de anode zo dicht mogelijk bij het werkstuk is doorgaans gunstig.

De meeste elektrolyten zijn agressieve oplossingen. Indien restanten achterblijven in het product, kan dit leiden tot corrosie. Een ander gevaar is dat milieubelastende stoffen achterblijven, die later alsnog vrijkomen. Als constructieonderdelen die vol kunnen lopen of zich vol kunnen zuigen niet vermeden kunnen worden, moeten zodanige maatregelen genomen worden, dat deze achteraf leeg kunnen stromen en goed te reinigen zijn.

Dit zijn uiteraard kostenverhogende maatregelen die bij voorkeur moeten worden vermeden.

### Basismateriaal

Het materiaal moet elektrisch geleidend zijn, of elektrisch geleidend kunnen worden gemaakt.

### Waterstofverbrossing

Afhankelijk van de procesparameters kan waterstofontwikkeling optreden, wat in het basismateriaal kan diffunderen en daar waterstofverbrossing veroorzaken. Onder andere hoge sterkte staalsoorten, ferritische en martensitische staalsoorten zijn gevoelig voor waterstofverbrossing. Een voorbeeld is het bekende delayed cracking (zie kader 5.1) van elektrolytisch verzinkte hoge sterke bouten. Om waterstofverbrossing te voorkomen, moeten materialen die daarvoor gevoelig zijn, worden uitgegloeid. Voor staalsoorten betekent dit doorgaans enkele uren gloeien op 200-250 °C.

Delayed cracking is een faalmechanisme, waarbij onder invloed van waterstof het basismateriaal verbrost. Het verbrossingsmechanisme is gebaseerd op de diffusie van waterstof naar onder andere korrelgrenzen onder invloed van waterstof naar onder andere restspanningen in het materiaal. Omdat diffusie tijd vraagt, zal falen pas na enige tijd optreden, vandaar de naam delayed cracking (eng: delayed = vertraagd)

### kader 5.1 Verklaring van 'delayed cracking'

### Deklaagmateriaal

Naast de functionaliteit, die de keuze van de deklay bepaalt, wordt deze keuze ook bepaald door badspecifieke eigenschappen. Zo zal niet elk bad alle oppervlakken, afhankelijk van de geometrie, gelijkmatig bedekken. Dit hangt af van het dekkend vermogen van een galvanisch bad. Het dekkend vermogen van een galvanisch bad bepaalt of dieper gelegen delen van een product van een deklay kunnen worden voorzien. Voordat een deklay op basis van de gewenste functionaliteit wordt gekozen, zal daarom bij twijfel eerst met de applicateur moeten worden overlegd.

## 5.6 Stroomloze metaalafscheiding

Naast de galvanotechniek, waarbij een stroombron wordt gebruikt, zijn er diverse andere manieren om metaal op een ondergrond aan te brengen. Slechts die processen, waarbij zonder stroombron uit een (meestal waterige) vloeistof metaalafscheiding plaatsvindt, rekent men tot de stroomloze metaalafscheiding (VOM Vademecum, 2002 [6]).

De volgende vormen van stroomloze metaalafscheiding (voor een beschrijving van deze processen wordt verwezen naar de VOM Vademecum, 2002 [6]) worden onderscheiden:

- ▶ vorming van een dompelneerslag in een uitwisselingsproces;
- ▶ contactproces voor metaalafscheiding;
- ▶ autokatalytische metaalafscheiding;
- ▶ niet-katalytische metaalafscheiding;
- ▶ reductiemetaalafscheiding op niet-metalen.

Met deze technieken is een groot aantal metalen op een groot aantal oppervlakken neer te slaan (zie tabel 5.10). Nadeel van stroomloze metaalafscheiding is, dat de badchemie doorgaans ingewikkelder is. Goed aanbrengen van deze deklayen vraagt daarom veel expertise.

### 5.6.1 Ontwerpaspecten

- ▶ Laagdikten typisch voor stroomloze metaalafscheiding liggen tussen 2,5 en 50 µm.
- ▶ Stroomloos aangebrachte lagen zijn eerder porievrij dan galvanisch aangebrachte metallische deklayen. Voor nikkel geldt bijvoorbeeld dat stroomloos aange-

tabel 5.10 Metalen <sup>1)</sup>, die met stroomloze metaalafscheiding kunnen worden aangebracht op verschillende basismaterialen [6]

alle processen	autokatalytisch	niet-katalytisch	contact
Be <sup>2)</sup>	–	–	–
Ti	Ti	–	Ti
V	V	–	–
Cr	Cr	Cr	Cr
Mn	–	–	Mn
Fe	Fe	Fe	Fe
Co	Co	–	Co
Ni	Ni	Ni	Ni
Cu	Cu	Cu	Cu
Zn	Zn	Zn	Zn
Ga	–	–	Ga
As	–	As	–
Se	Se	–	–
Zr <sup>2)</sup>	–	–	–
Nb	Nb	Nb	–
Mo	Mo	–	Mo
Ru	Ru	Ru	–
Rh	Rh	Rh	–
Pd	Pd	Pd	–
Ag	Ag	Ag	Ag
Cd	Cd	–	Cd
In	In	In	–
Sn	Sn	Sn	Sn
Sb	Sb	–	Sb
W	W	–	–
Re	Re	–	–
Os	Os	–	–
Ir	Ir	–	–
Pt	Pt	Pt	–
Au	Au	Au	Au
Hg	–	–	Hg
Pb	Pb	Pb	Pb
Bi	–	–	Bi

1) De elementen zijn vermeld in de volgorde van het periodiek systeem  
2) Geen nadere aanduiding in de literatuur

brachte nikkellagen vanaf 30 µm porievrij zijn, tegen 50 µm voor galvanisch nikkel.

- Stroomloos aangebrachte metaallagen vinden onder meer toepassing als slijtvaste en corrosiewerende deklagen. Ook esthetische toepassingen vinden plaats.
- Met stroomloze processen kunnen deklagen op metalen, maar ook op kunststoffen worden aangebracht.
- In tegenstelling tot bijvoorbeeld galvanisch aangebrachte deklagen, spelen scherpe overgangen geen rol.

### 5.6.2 Voorbeelden toepassingen

Ter illustratie is hier een aantal voorbeelden van toepassingen van stroomloos vernikkelen opgenomen:

- In de auto-industrie wordt vooral gebruik gemaakt van de slijtvaste eigenschappen van stroomloos nikkel. Typische toepassingen zijn onderdelen van versnellingsbakken, carburateurs, nokkenassen en onderdelen van de airconditioningapparatuur.
- In de chemische industrie treft men stroomloos nikkel aan in filters, compressoren, kleppen en warmtewisselaars.
- In de elektronica vindt men stroomloos nikkel voor afschermingen van straling, bij de vervaardiging van printplaten, connectors en halfgeleider-elementen, radarantennes en golfpijpen van radar, alsmede harde schijven voor computers.
- In de elektrotechniek treft men aan bedieningsknoppen, contactmaterialen en schakelaars.
- Bij de gaswinning en -distributie vindt men vooral slijtvaste en corrosievaste toepassingen zoals kleppen, afsluiters en meetinstrumenten.

- In de grafische industrie ziet men stroomloos nikkel toegepast op plaatsen waar men ook vaak hardchrom gebruikt. Op drukwalsen kan men zeer gladde oppervlakken verkrijgen.
- Bij hydraulische apparatuur gebruikt men stroomloos nikkel op kleppen in cilinders en op zuigers. Vooral de slijtvastheid is hier van belang.
- In de kunststoffenindustrie zijn het walsen, kleppen, molens, extruders, diverse matrijzen en onderdelen van poederspuitapparatuur.
- In de levensmiddelenindustrie treft men aan molens, afsluiters, pompen, walsen en afvalapparatuur met chemisch nikkel.
- Talrijke toepassingen zijn er in de luchtvaart: flenzen, bouten, onderdelen van gyroscopen, kleppen, turbineassen en tal van andere toepassingen.
- In de algemene machinebouw treft men aan onderdelen van draaibanken, hefboomen, roterende assen, meetapparatuur, bouten en moeren.
- In de mijnbouwindustrie is het zowel de corrosievastheid als de slijtvastheid van stroomloos nikkel die van belang zijn. Onderdelen van graaf- en boormachines, kleppen, tandwielen en afsluiters.

### 5.7 Badprocessen

De hier kort behandelde thermische badprocessen betreffen het aanbrengen van deklagen door onderdompeling in een bad met gesmolten metaal. Doorgaans zijn dit laagsmeltende metalen en legeringen van:

- Zink;
- Aluminium (hiervan bestaan twee typen: Type 1 een Aluminium-Silicium legering en Type 2 commercieel zuiver aluminium);
- Aluminium-Zink (55Al-Zn);
- Lood-Tin.

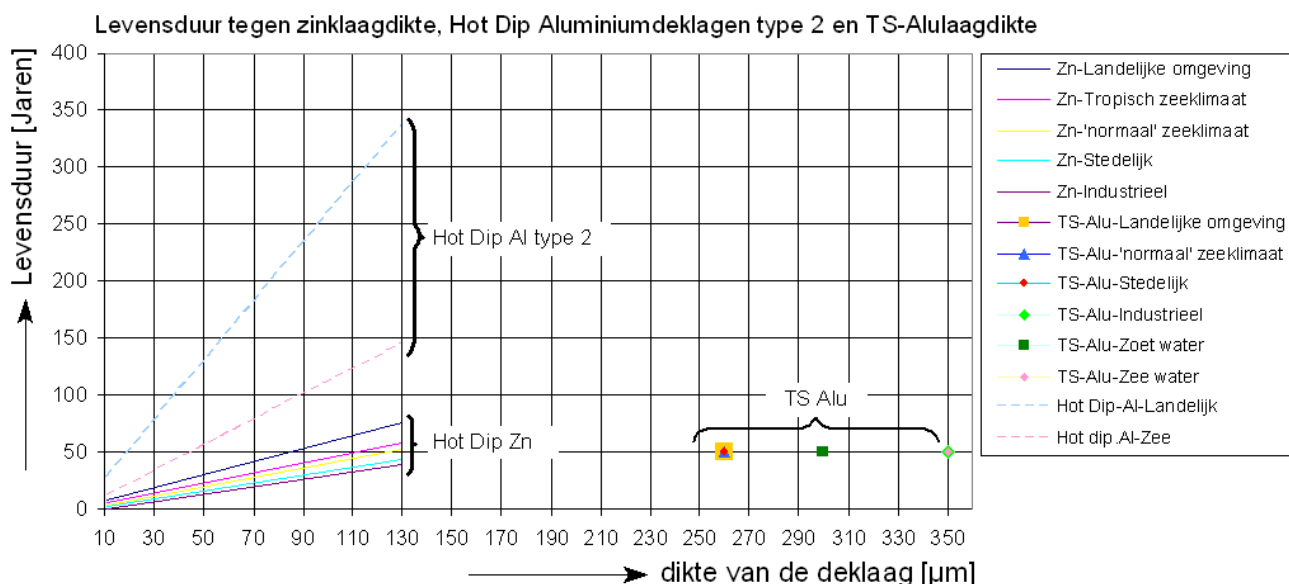
De Aluminium-Zink deklagen zijn ontwikkeld om de voordelen van galvanische aluminium-deklagen en zink-deklagen te combineren. Ten opzichte van zink-gegalvaniseerd staal, wordt met 55Al-Zn deklagen een verbetering in atmosferische corrosievastheid van een factor 2-6 bereikt (ASM Handbook vol 5, 1992). De corrosiebescherming van 55Al-Zn deklagen is echter lager dan van aluminium type 2 deklagen.

Over het algemeen worden deze deklagen aanbracht voor corrosiebescherming via kathodische bescherming, wat betekent dat de deklaag zich opoffert ten gunste van het basismateriaal. Dit betekent dat de deklaagdikte een relatie heeft met de maximale periode waarover de deklaag bescherming kan bieden. Dit is in figuur 5.15 aangegeven voor galvanisch aangebrachte Zn-deklagen en Al-type 2-deklagen (Type 2 aluminium deklagen bestaan uit commercieel zuiver aluminium). De dikte van zink- en aluminiumlagen wordt meestal uitgedrukt in deklaagmassa in g/m<sup>2</sup>. Ter vergelijking zijn tevens enkele resultaten voor thermisch gespoten aluminium lagen, TS-Alu, opgenomen. Deze zijn overgenomen uit de publicatie TI.05.25 "Thermisch Gespoten Aluminiumlagen".

Doorgaans worden deze deklagen aangebracht op staal. Over het algemeen bieden aluminiumdeklagen (zowel thermisch gespoten als galvanisch aangebracht) bij een zelfde laagdikte een ca. 2 keer langere bescherming dan (galvanisch) zink.

De zink en aluminium deklagen worden aangebracht via een dompelp proces. Het product dat van een deklaag moet worden voorzien, wordt ondergedompeld in een bad met gesmolten metaal. De onderdompeltijd en badtemperatuur bepalen daarbij de uiteindelijke laagdikte.

Voor een beschrijving van het thermisch spuitproces voor het aluminiseren wordt verwezen naar de publicatie TI.05.25 "Thermisch Gespoten Aluminiumlagen" en het hoofdstuk over thermisch spuiten in deze publicatie.



figuur 5.15 Relatie tussen de zinklaagdikte, aluminiumlaagdikte en de levensduur. Ter vergelijking zijn de gewenste laagdikten voor thermisch gespoten aluminium weergegeven (ASM Handbook Vol 5, 1992; Ros, D, 2004)

### 5.7.1 Ontwerpaspecten bij thermisch verzinken en aluminiseren

Voor het aanbrengen van aluminium deklaag met thermisch spuiten wordt verwezen naar de publicatie 'Toepassing van Thermisch Gespoten Aluminiumlagen' in dit project.

Bij de keuze van het te verzinken of te aluminiseren materiaal moet rekening worden gehouden met het volgende (zie ook tabel 5.11):

- ▶ de badtemperatuur;
- ▶ de gewenste laagdikte;
- ▶ de chemische samenstelling van het basismateriaal. Bij een basismateriaal met een hoog siliciumgehalte (boven 0,05%) zal de aangroei van een thermische zinklaag hoger zijn. Andere elementen die voor goed galvanisch verzinken beperkt moeten blijven, zijn koolstof (max 0,25%), fosfor (max 0,05%) en mangaan (max 1,3%). Hoewel materialen met hogere verontreiniging wel verzinkt kunnen worden, vraagt dit echter wel extra maatregelen;
- ▶ galvanisch contact met andere materialen;
- ▶ geometrie van de constructie, gebruikstemperatuur;
- ▶ gesloten holle ruimtes moeten worden voorkomen. Voor het uitstromen van vloeibaar metaal moeten voorzieningen worden getroffen in de vorm van uitstroomopeningen.

Deze parameters hebben invloed op de uiteindelijke laagdikte, eventuele onregelmatigheden in de laagdikte en vormveranderingen van de constructie als gevolg van ontlaateffecten.

## 6 Kostenaspecten

Bij het vaststellen van de integrale kostprijs moet rekening worden gehouden met een groot aantal aspecten. Daarbij zijn de initiële kosten zeker niet de belangrijkste. De onderhoudskosten, milieu- en verwijderingskosten dragen evenveel, zo niet nog meer bij aan de integrale kostprijs. Het maken van een LCA, Life Cycle Analyses, is zeker aan te bevelen. Voor het bepalen van de integrale kostprijs zijn software pakketten beschikbaar. Een voorbeeld is het pakket genaamd LCC Lite.

In deze publicatie omvatten de integrale kosten:

- ▶ Ontwerpkosten;

- ▶ Proceskosten (voor het aanbrengen van de deklaag);
- ▶ Onderhoudskosten van de deklaag in bedrijf;
- ▶ Operationele kosten van het gecoate product, waar- onder ook niet geplande stilstandskosten;
- ▶ Verwijderingskosten, waaronder afdanken en/of hergebruiken;
- ▶ Milieukosten.

Per deklaagtechniek worden de kosten sterk beïnvloed door de verschillende kostenaspecten. Het is daarom niet goed mogelijk een kwantitatieve indeling te geven naar deklaag. Voor elke toepassing zullen de verschillende kostenaspecten beschouwd moeten worden. Daarom zal in dit hoofdstuk per kostenaspect getracht worden een indicatie te geven aan welke aandachtspunten moet worden gedacht. Waar van toepassing zal per deklaagtechniek nog een nadere toelichting worden gegeven.

### 6.1 Overwegingen bij het opmaken van de kostenvergelijking

#### 6.1.1 Ontwerp

De restricties die een deklaagtechniek oplegt aan het ontwerp kunnen de kosten van een ontwerp beïnvloeden. Maatvoering, eisen gesteld aan het oppervlak, overgangen en dergelijke bepalen voor een deel de kosten voor het ontwerp van het product.

*Bijvoorbeeld:*

- ▶ Thermisch spuiten en lasercladden geven een lage thermische belasting van het basismateriaal. Bij het ontwerp hoeft minder rekening te worden gehouden met thermische belasting van het product, wat deze fase hierin meer vrijheden zal geven. Oplossen daarentegen brengt een hoge thermische belasting met zich mee.
- ▶ Thermisch spuiten is een line-of-sight techniek, wat betekent dat afgeschermd delen niet goed van een deklaag kunnen worden voorzien. Bij het ontwerp moet hiermee rekening worden gehouden, wat kostenverhogend kan werken in de ontwerpfase.
- ▶ Elektrolytische technieken stellen eisen aan de overgangen in een product. Bij scherpe overgangen zal de laag sneller aangroeien als gevolg van hogere stroomdichtheden. Stroomloze metaalafschrijving en badprocessen ondervinden hier geen problemen bij.

tabel 5.11 Parameters en aspecten bij thermische deklaagprocessen

Parameter	Waarden	Effecten
Badtemperatuur:	Voor thermisch verzinken is de badtemperatuur 450-570 °C  Voor thermisch aluminiseren is de badtemperatuur ca. 700 °C	Afhankelijk van het materiaal dat van een deklaag moet worden voorzien, kunnen inwendige spanningen relaxeren, waardoor producten bijvoorbeeld kunnen kromtrekken. Ook kunnen de mechanische eigenschappen van materialen als gevolg van rekristallisatie wijzigen. Vermoeieigenschappen kunnen verslechteren. Met name van silicium gekalmeerd staal is dit bekend bij thermisch verzinken
Laagdikte:	Zink: De als gangbaar aangebrachte laagdikte. Voor Zinkdeklaag is dit ca 20 µm voor continu ge-coate plaat en 11-130 µm voor batch verzinkte producten.	Chemische samenstelling: Si, P, C en Mn beïnvloeden de aangroei van zinklagen. Dompeltijd: bepaalt primair de uiteindelijke laagdikte Levensduur: afhankelijk van de laagdikte
	Aluminium: Voor aluminiseren zijn de typische laagdikten 30-50 µm).	Dompeltijd: bepaalt primair de uiteindelijke laagdikte Levensduur: afhankelijk van de laagdikte
Galvanisch/elektrisch contact met andere metalen:	Bij de toepassing moet rekening worden gehouden met galvanisch contact met andere metalen.	Bijvoorbeeld in galvanisch contact met austenitisch roestvast staal 18/8, kan de corrosiesnelheid van gegalvaniseerd staal substantieel hoger liggen
Geometrie	Inwendig van een deklaag voorzien	Doordat wordt ondergedompeld in een bad gesmolten metaal, is deze techniek zeer geschikt voor het aanbrengen van inwendige deklaag. Voorwaarde is wel dat er in-/uitstroomopeningen in het ontwerp zijn voorzien.
	Scherpe overgangen	De techniek is niet gevoelig voor scherpe overgangen. Het hele oppervlak, mits goed voorbehandeld, wordt gelijkmatig bedekt
Gebruikstemperatuur	Zink: maximaal 260 °C	--
	Aluminium: maximaal 610 °C voor toepassingen in hoog temperatuur gascorrosie is onder voorwaarden 1150 °C mogelijk	Voor aluminium geldt dat voor gebruikstemperaturen boven de smelttemperatuur van 610 °C, het basismateriaal goed gekoeld moet zijn. Het aluminiumoxide kan dat een uitstekende bescherming tegen gascorrosie (oxidatie) geven
Chemisch samenstelling basismateriaal	Zink	Onder andere silicium heeft een invloed op de aangroeisnelheid van zinklagen. Ook lokaal hogere silicium concentraties, zoals vaak in lasmetaal, geven lokaal aanleiding tot hogere aangroeisnelheden

Schroefdraad kan daarom wel stroomloos vernikkeld worden met een gelijkmatige laagdikte. Met elektrolytische processen is dit niet mogelijk.

- ▶ Elektrolytische technieken, thermisch spuiten en explosief cladden stellen bij inwendig coaten beperkingen aan de minimale diameter. Lasercladden en thermische processen geven hier weer meer vrijheden.
- ▶ Bij thermische (stroomloze) en elektrolytische deklaagprocessen moet het ontwerp van de producten zodanig zijn, dat restanten uit het bad weg kunnen stromen. De producten moeten gespoeld kunnen worden. Als restanten van het blad achterblijven, kan in een later stadium, bij gebruik, corrosie optreden.

### 6.1.2 Proceskosten

Tabel 6.1 geeft een indicatieve vergelijking voor de kosten per deklaagtechniek. Voor dunne deklaag is ter vergelijking een indicatie voor CVD en PVD opgenomen. In de proceskosten voor het aanbrengen van de deklaag zijn voornamelijk apparatuur, onderhoudskosten, materiaalkosten en voor- en nabewerkingskosten opgenomen.

#### Oplassen

Elektroslaklassen met band is interessant voor werkstukken met een minimum oppervlak van 220 mm<sup>2</sup>. De minimale inwendige diameter voor werkstuk stukken is 350 mm (met een kleine laskop) en de minimale plaatdikte is 30 mm. Een stationaire opstelling is hierbij een voorwaarde.

De overgangszone tussen het oorspronkelijke moeder-materiaal en de opgelaste laag is qua chemische samenstelling 0,2 mm. In principe moet worden uitgegaan van een vlakke situatie in de PA-laspositie (waterpas opstellen!).

Als voorbeeld voor de proceskostenberekening bij het oplassen is in tabel 6.2 een rekenvoorbeeld gegeven voor het elektroslaklassen met band (peildatum 1 januari 2005).

tabel 6.1 Vergelijking tussen de kosten voor het coaten per deklaagtechniek

	kosten	
	apparatuur	aanbrengen
thermisch spuiten	laag-hoog <sup>1)</sup>	laag-gemiddeld <sup>1)</sup>
oplassen	laag-gemiddeld	laag-hoog
lasercladden	gemiddeld-hoog	laag-gemiddeld
explosief cladden	laag-hoog	laag-hoog
elektrochemische dek-lagen	gemiddeld-hoog	laag
stroomloos thermisch aangebrachte dek-lagen		
CVD (ter vergelijking)	gemiddeld	laag-gemiddeld
PVD (ter vergelijking)	gemiddeld-hoog	gemiddeld-hoog

1) Sterk afhankelijk van gebruikte techniek (zie tabel 6.3)

tabel 6.2 Voorbeeld van proceskostenberekening voor het elektroslaklassen met band

Neersmelt-gegevens	band 20 kg à € 15	€ 300, =
	poeder 16 kg à € 5	€ 80, =
	machine + loonkosten € 100/uur	€ 100, =
	totaal/uur	€ 480, =
	per kg	€ 24, =

#### Lasercladden

Een veel gehoord argument bij laserbewerkingen is, dat ze weinig energiezuinig zijn. Dit is een discutabele stelling. CO<sub>2</sub>-lasers en Nd:YAG-lasers hebben een betrekkelijk gering elektrisch rendement, het rendement van diode-lasers en in de toekomst te verwachten fiberlasers ligt aanzienlijk hoger.



Deze rendementen bedragen momenteel:

- CO<sub>2</sub>-lasers: 10 - 15 %
- lampen gepompte Nd:YAG-lasers: 2 - 3 %
- diode gepompte Nd:YAG-laser: 8 - 12 %
- diodelasers: 20 - 30 %

Echter niet alleen het rendement telt. Belangrijker is welk resultaat met de bewerking kan worden verkregen en of hetzelfde ook op een energiezuinigere (en goedkopere manier, berekend op basis van Total Cost of Life) verkregen zou kunnen worden. Nagenoeg altijd zal blijken dat als laatstgenoemde beschouwing wordt toegepast, lasercladden een dure techniek is, die tot een lage Total Cost of Life leidt, door toepassing waarbij de levensduur aanzienlijk wordt verlengd of producten met aanzienlijk mindere voor- en nabewerking kunnen worden gemaakt.

### Thermisch spuiten

Bij het aanschaffen van een thermisch spuitsysteem komen naast de spuitapparatuur nog andere kosten om de hoek kijken. Deze worden voornamelijk bepaald door de maatregelen welke men moet nemen om milieu en mens te beschermen (zie § 8.3).

Door de grote variatie in spuitapparatuur zijn er grote verschillen in proceskosten tussen de verschillende thermische spuittechnieken. In tabel 6.3 is een indicatie gegeven van de relatieve proceskosten per spuittechniek in volgorde van oplopende kosten. Tevens is een indicatie voor de deklaagkarakteristieken gegeven. Uit deze tabel blijkt dat voor de keuze van een proces, eerst naar de gewenste deklaagkarakteristiek moet worden gekeken en daarna pas naar de proceskosten. Het duurste proces zal niet voor elke toepassing de beste deklaag kunnen leveren.

tabel 6.3 Relatieve proceskosten en deklaagkarakteristieken per thermische spuittechniek [2]

Spuitproces	Relatieve proceskosten <sup>1)</sup>	deklaag karakteristieken		
		sterkte (relatief)		oxide gehalte [%]
		Adhesief	Cohesief	
Elektrisch draadspuiten	1	6	hoog	0,5-3
Autogeen poederspuiten	3	3	laag	6
Autogeen draadspuiten	3	4	gemiddeld	4
HE-plasma spuiten (HE-APS)	4	8	zeer hoog	0
Atmosferisch plasma spuiten (APS)	5	6	hoog	0,5-1
High Velocity Oxygen Fuel (HVOF)	5	8	zeer hoog	0
Cold Spray <sup>2)</sup>	6 <sup>3)</sup>	8	zeer hoog	<0,1-0,5
Vacuüm plasma spuiten (VPS)	10	9	zeer hoog	<10 <sup>-6</sup>
Detonatie spuiten (D-gun)	10	8	zeer hoog	0

1) Lage kosten, 10 hoge kosten  
2) Bron: Flame Spray Technology  
3) De investeringen zijn laag, echter de gaskosten zijn hoog indien geen recycling wordt toegepast

### Explosief cladden

Met deze bekledingstechnologie kunnen metaallagen met een dikte tussen 0,1 en 30 mm worden aangebracht op metalen oppervlakken. De metalen dienen wel over een minimale rekbaarheid van circa 10% te beschikken. Ook is het bekleden van zwakke (onlegeerde) metalen eenvoudiger dan metalen (legeringen) met hoge sterkte. Onlegeerde platen met een dikte tussen 2 en 10 mm worden standaard aangebracht. Dit wordt op grote schaal uitgevoerd met platen van vele vierkante meters

tegelijk. Het proces is echter ook uitvoerbaar op een geringe schaal (vierkante centimeters) of lokaal op een groter basismateriaal. In alle gevallen betreft het een niet-geautomatiseerd batch-proces, hetgeen dus altijd vrij veel manuren vergt. De platen hoeven geen chemische reiniging van het oppervlak te ondergaan (wel wordt de oxidehuid vooraf weg geschuurd).

Doordat voor dunne platen (< 1 mm) en folies gebruik wordt gemaakt van een extra driver-plaat, is het explosief aanbrengen hiervan duurder.

In sommige gevallen is het mogelijk een dikkere deklaag samen met het basismateriaal te walsen tot de gewenste dikte. Hierbij kunnen de uiteindelijke kosten lager uitvallen dan het oppervlak direct te bekleden met een dunne folie. Hetzelfde is uitvoerbaar met beklede buizen of stafmateriaal door deze nadien via een buis- of draadtrekproces uit te rekken.

### Galvanische deklaagprocessen

Installaties voor galvanische processen zijn kapitaalsintensief en zullen zeker kostbaarder worden, omdat eisen ten aanzien van milieu en Arbo steeds strenger worden. Ook als om die reden gekozen wordt voor gesloten systemen, is de investering hoog.

Een voordeel is dat de afschrijvingsperioden vrij lang zijn en de afschrijvingskosten per oppervlakte-eenheid product vrij laag zijn, evenals de verbruiksmaterialen. Wel zullen in toenemende mate de stijgende milieu- en Arbo-kosten in de prijs moeten worden doorberekend.

Pas bij serieproductie is het te overwegen om galvanische coatings zelf te gaan aanbrengen en te integreren in het proces en niet meer uit te besteden aan gespecialiseerde galvanobedrijven. De trend is evenwel dat galvanische bewerkingen steeds vaker worden uitbesteed.

### 6.1.3 Onderhoudskosten bij de selectie van een deklaag

Bij de keuze van een deklaag moet rekening worden gehouden met te verwachten onderhoud. Onderhoudskosten zijn meestal de grootste kostenpost bij het in gang houden van een installatie. Deze kosten worden veroorzaakt door:

- stilstand (productieverlies);
- inspectie;
- het uitvoeren van het onderhoud zelf.

Als de gekozen deklaag leidt tot lagere onderhoudskosten (zie ook kader 6.1 en 6.2), zijn initieel hogere stichtingskosten (het aanbrengen van de deklaag) snel terugverdiend door lagere onderhoudskosten. Bij de besparing op de onderhoudskosten moet gedacht worden aan:

- verlengen van de inspectietermijnen (TBO: Time Between Overhaul);
- verminderen van het aantal inspectietermijnen door het verlengen van de korte inspectietermijnen van onderdelen naar een termijn die bijvoorbeeld samenvalt met groot onderhoud;

Galvanische en stroomloos aangebrachte deklaagen en dikke lagen in het algemeen worden zelden gekozen op decoratieve gronden, maar altijd uit kostenoverwegingen. Bedrijfskosten worden verlaagd door galvanische coatings, omdat deze, ongeacht of er voor harde slijtvaste lagen of voor een primair corrosiewerende laag wordt gekozen, de bedoeling hebben de TBO's (Time Between Overhauls) te verlengen. Zeker als er installaties moeten worden stilgelegd, is een onderhoudsbeurt een kostbare zaak.

Om die reden zijn onderhoudskosten tijdens bedrijf ook van grote invloed op de bedrijfskosten. Door lokale reparatiemogelijkheden kan een beginnend schadegeval vaak beheerst tot het eerstvolgende geplande onderhoud worden gerekt.

kader 6.1 Bedrijfskostenverlaging door galvanische coatings



Een voorbeeld voor een verlaging van onderhoudskosten is het vervangen van organische deklagen door bijvoorbeeld thermisch gespoten aluminium (TSA). Met name doordat de onderhoudstermijnen drastisch verlengd kunnen worden, dalen de totale (integrale) kosten. In de procesindustrie worden daarbij kostenreducties van een factor 3-4 ten opzichte van organische deklagen bereikt.

#### kader 6.2 Voorbeeld van verlaging onderhoudskosten

- verminderen van het aantal inspectiepunten;
- vereenvoudigen van inspecties;
- repareerbaarheid van deklagen. Als van een deklaag de slijtage-/corrosiesnelheid bekend is, kan deze preventief bij groot onderhoud worden hersteld. Het gesleten onderdeel kan bijvoorbeeld door een reserve worden vervangen, waarna het gesleten onderdeel kan worden gerepareerd met een minimaal productie-verlies. Niet elke deklaagtechniek leent zich hiervoor.

#### 6.1.4 Operationele kosten

Deklagen kunnen de bedrijfskosten van een installatie verlagen. Door betrouwbare en reproduceerbare deklagen aan te brengen worden bedrijfszekerheid en beschikbaarheid van de installatie verhoogt. Ook kunnen installaties efficiënter werken, doordat bijvoorbeeld:

- de mechanische belasting kan worden verhoogd (verminderde slijtage). Denk daarbij aan de deklagen die op gereedschappen worden toegepast (zie TI.05.23 "Toepassingen van dunne deklagen" 21));
- de thermische belasting hoger kan worden. Denk daarbij bijvoorbeeld aan de TBC-deklagen op turbineschepen, waardoor gasturbines op hogere temperaturen kunnen werken;
- de betrouwbaarheid wordt verhoogd. In de automobiellindustrie worden daarom veel deklagen toegepast
- de reinigbaarheid van het oppervlak wordt verbeterd. Vuil blijft minder op het oppervlak zitten.

#### 6.1.5 Verwijderingskosten

Aan het einde van de levensduur van een product of installatie zal deze moeten worden afgevoerd. Daarmee komt deze in de afvalstroom terecht. Afhankelijk van het materiaal/product en de materiaalcombinaties kan dit tot problemen in de afvalstroomscheiding leiden.

Of deklagen hierbij tot extra kosten leiden, hangt onder andere af van het feit of de deklaag eenvoudig is te verwijderen. De combinatie van moeilijk te verwijderen deklagen en ongewenste materiaalcombinatie bij recycling kunnen kostenverhogend werken. Enkele voorbeelden:

- Verzinkt staal: Grote hoeveelheden verzinkt staal zijn ongewenst bij het recyclen van staal. Het zink zal eerst verwijderd moeten worden. Dit kan door het materiaal te verhitten tot een temperatuur waarbij het zink smelt en van het oppervlak vloeit. Eventuele organische deklagen kunnen daarbij extra kostenverhogend werken.
- Gealuminiseerd staal: levert mogelijk minder problemen op. Aluminium wordt in de staalindustrie toegepast bij het kalmeren van de smelt en als desoxidant. Zekere hoeveelheden zullen dus toegestaan zijn bij recycling.
- Chroom/nikkel (molybdeenhoudende) deklagen (roestvast staal): leveren mogelijk ook minder problemen op, daar chroom en nikkel legeringselementen voor staal zijn.
- Harde deklagen, keramische of van cermets: zijn in de recycling mogelijk weer problematisch. Keramische deeltjes zijn doorgaans ongewenst.
- Deklagen met cadmium en lood: zijn zeer milieubelastend en zullen hoge kosten bij verwerken met zich meebrengen.

#### 6.1.6 Milieukosten

In hoofdstuk 8 wordt nader op dit aspect ingegaan. In

gebruik kunnen deklagen milieubelastend zijn. Zinkdeklagen offeren zich op en belasten daarmee het milieu met zink-corrosieproducten. Deze zijn giftig. Van gealuminiseerd staal daarentegen, mits juist toegepast, zal de deklaag niet of nauwelijks corroderen. Als de aluminium-deklaag toch zijn kathodische bescherming gaat geven, worden er corrosieproducten gevormd die inert zijn, het milieu niet belasten en doorgaans op de deklaag blijven zitten.

Een verzinkt oppervlak wordt vaak als extra bescherming voorzien van een organische coating. Bij onderhoud aan deze organische coating moeten extra milieumaatregelen worden getroffen. De organische coating moet namelijk in zijn geheel worden gestript, wat met gritstralen gebeurt. Grit en afgestralde organische coating moeten worden opgevangen en afgevoerd als chemisch afval. De keuze van een deklaag waarvoor geen aanvullende organische deklagen nodig zijn, zijn dus minder milieubelastend.

### 7 Normen en normering

Een overzicht van recente normen op het gebied van deklaagtechnologie kan men raadplegen op de website van het Nederlands Normalisatie Instituut ([www.nen.nl](http://www.nen.nl)). Via deze website kunnen normen worden besteld en samenvattingen worden ingezien.

### 8 Milieu- en Arbo-aspecten

#### 8.1 Oplassen

Het Nederlands milieubeleid is vastgelegd in het Nationale Milieubeleidsplan. FME-CWM en Metaalunie hebben een werkboek Milieumaatregelen ontwikkeld als hulpmiddel om milieuproblemen op te lossen. Het "Werkboek milieumaatregelen metaalektro industrie" is gratis te downloaden van de site [www.fo-industrie.nl](http://www.fo-industrie.nl).

Milieubelastende aspecten tijdens het lassen en snijden zijn:

- emissie naar lucht;
- emissie naar water;
- energie;
- lichthinder;
- opslag van gassen;
- afvalbehandeling.

Bij het oplassen spelen de volgende milieu- dan wel Arbo-gerelateerde aspecten een rol:

- *Hoge licht intensiteit (UV en Infra rood)*: het zonder oogafscherming lang in een lasboog kijken kan leiden tot schade aan de ogen. Dit kan van tijdelijke aard zijn, maar bij extreme blootstelling kan de schade permanent worden.
- *Lasrook*: bij het lassen en snijden van metalen komen las- en snijrook vrij, bestaande uit gassen en stof. Inademing van deze rook kan leiden tot schade aan de gezondheid. Ter beperking van dit risico zijn grenswaarden gesteld aan de hoeveelheid lasrook waaraan werknemers mogen worden blootgesteld. Deze grenswaarden zijn bekend als de zogenaamde MAC-waarde (Maximaal Aanvaarbare Concentratie). De MAC-waarde voor lasrook van ongelegeerd staal is 3,5 mg per m<sup>3</sup> lucht. Als hulpmiddel voor het overheidstoezicht en -handhaving is een Arbeidsomstandighedenwet 4.9-2 opgesteld. Van de website [www.lasrook-online.nl](http://www.lasrook-online.nl) zijn verschillende publicaties te downloaden, o.a. de Praktijkrichtlijn, aan de hand waarvan bedrijven zelf kunnen bepalen welke maatregelen genomen moeten worden om aan de wettelijk gestelde MAC-waarde te kunnen voldoen. De te nemen maatregelen moeten worden getroffen in de volgorde van de zogenaamde Arbeidshygiënische Strategie (AHS). Wel moet rekening worden gehouden met de technische, economische en operationele haalbaarheid van de aanpak/maat-

regelen. De maatregelen bestaan uit de volgende stappen:

- aanpak van de bron (bijv. ander "schoner" lasproces);
- bronafzuiging/ruimteventilatie;
- scheiding van mens en bron;
- persoonlijke adembeschermingsmiddelen (PBAM).

De Arbobeleidsregel 4.9-2 geeft een praktische invulling van de Arbowetgeving in werkplaatssituaties. Deze is in te zien op de website van het FNV Bureau Beroepsziekten ([www.bbzfnn.nl](http://www.bbzfnn.nl)). Hierin worden richtlijnen gegeven met betrekking tot o.a. schadelijke bestanddelen en/of verbindingen van CrVI en Ni en ozon. Lasrook moet worden afgezogen en gefilterd. CrVI en Ni spelen vooral een rol bij het lassen van roestvast staal, terwijl ozon vooral bij het TIG-lassen van aluminium een rol speelt.

- *Hoge temperatuur (gesmolten staal).*

## 8.2 Lasercladden

Alle lasers waarmee lasercladwerkzaamheden worden uitgevoerd zijn hoogvermogen lasers en behoren tot laserklasse 4. Dit zijn lasers waarvoor de zwaarste veiligheidseisen van toepassing zijn.

In het algemeen wordt met lasersystemen die hoogvermogen lasers bevatten, gestreefd naar systemen die volledig gesloten zijn, waarmee deze systemen worden teruggebracht tot laserklasse 1 systemen. Dit zijn systemen waarbij de laserbundel niet naar buiten kan treden en mocht dit wel het geval zijn, met een zodanig vermogen, dat deze geen gevaar oplevert ( $< 1$  mW). Indien echter de operator en anderen zich in de nabijheid van de laserbundel kunnen bevinden, dienen adequate maatregelen te worden genomen, zodat geen onveilige situaties kunnen ontstaan.

Voor het veilig werken geldt daarom het volgende:

- Het dragen van een goede laserbril en eventueel beschermende kleding is, in een omgeving waar met een hoogvermogen laser wordt gewerkt, verplicht. Laserlicht kan de ogen onherstelbare schade toebrengen. Met zowel diodelasers, Nd:YAG-lasers en CO<sub>2</sub>-lasers wordt laserstraling gegenereerd die onzichtbaar is voor het menselijk oog. De straling van CO<sub>2</sub>-lasers wordt geabsorbeerd door het hoornvlies; de straling van diodelasers en Nd:YAG-lasers wordt door de pupil doorgelaten en gefocusseerd op het netvlies. Al bij geringe vermogens en/of intensiteiten kan de straling tot oogbeschadiging leiden; bij iets hogere vermogens en/of intensiteiten kan ook huidbeschadiging ontstaan of kunnen kledingstukken of andere materialen die door de laserbundel worden getroffen tot brand- of schroeischade leiden.
- De werkomgeving moet voor uittreden van de directe of gereflecteerde laserstraling, bijvoorbeeld met stralingsschermen, worden afgeschermd, zodat niemand buiten de werkruimte door de straling getroffen wordt.
- Voorkomen moet worden dat iemand zonder toestemming of bevoegdheid en zonder adequate beschermingsmiddelen de afgeschermd ruimte binnentreedt.  
*Opleiding van operators en instructie van bezoekers is daarom van essentieel belang.*
- Poeders die gebruikt worden bij het lasercladden zijn zeer fijn en daardoor intrinsiek gevaarlijk. Zeker als het gaat om poeders van zware metalen (chroom en nikkel). Nikkel valt, net als chroom, sinds 2004 onder de carcinogene stoffen. Dit in verband met de mogelijke oxidische verschijningsvormen van nikkel.
- Interactie poeder met laser en omgeving: andere aspecten bij het lasercladden zijn de effecten als gevolg van het werken met metaalpoeders en de interactie-effecten tussen laserbundel, metaalpoeder en basis-materiaal. Te allen tijde moet voor een goede afzuiging worden gezorgd, waardoor metaaldampen en damp- en rookontwikkeling als gevolg van de aanwe-

zigheid van vuil en vet op de interactieplaats worden afgezogen.

- Het metaalpoeder moet een zodanige deeltjesgrootte hebben, dat dit niet kan gaan zweven en daardoor eventueel kan worden ingeademd. Deeltjes dienen daarom groter te zijn dan 10 µm.

## 8.3 Thermisch spuiten

Bij thermisch spuiten zijn de volgende milieu- en Arboaspecten van belang:

- *Geluid:* Afhankelijk van de thermische spuittechniek die wordt gebruikt ligt het geluidsniveau tussen ca. 130-180 dBA. Een geluidsafscherming is bij het werken met thermische spuitsystemen daarom vereist. Indien op locatie wordt gewerkt, zal de werkplek moeten worden afgeschermd en moeten de spuiters afdoende persoonlijke beschermingsmiddelen gebruiken.
- *Licht:* Bij met name plasmaspuiten komt een hoge intensiteit UV licht vrij. De spuiters moeten hiertegen afdoende worden beschermd. UV licht kan de ogen beschadigen. Dit kan leiden tot de zogenoemde lasogen.
- *Stof:* Stof en dan met name metallische of oxidische deeltjes zijn afkomstig van het spuitproces zelf, maar ook het toevoegmateriaal wordt vaak in poedervorm toegepast. Dit spuitpoeder bestaat uit deeltjes met afmetingen tussen doorgaans 15-70 µm. Fijnere deeltjes tot 5 µm in diameter maken vaak een substantieel deel uit van het poeder. Tijdens het draadspuiten, zowel autogeen als elektrisch, komen fijne metallische en geoxideerde deeltjes vrij, in grootte variërend van submicron tot deeltjes van 30-50 micrometer. Fijne poederdeeltjes zijn intrinsiek gevaarlijk, zodat voldoende bescherming noodzakelijk is. Indien gewerkt wordt met poeders die zware metalen bevatten, moet een afdoende afzuiging aanwezig zijn. Thermisch spuiten vindt daarom doorgaans plaats in spuitcabines die zijn voorzien van een afzuigstelsel. Deze systemen zijn in staat tot bijna 100% van de overspray van het poeder af te vangen, zodat deze niet in het milieu terecht kunnen komen.
- *Hoge elektrische spanning.*
- *Gassen:* Bij het thermisch spuiten worden zowel reducerende, oxiderende als brandbare gassen gebruikt. Hiervoor dienen de juiste veiligheidsmaatregelen te worden genomen.
- *Hitte:* De thermische spuitvlam is extreem heet.
- *Milieubelasting:* De belangrijkste vorm van milieubelasting zijn de vrijkomende deeltjes. Bij een goed werkend afzuigstelsel is dit probleem uitstekend te ondervangen. De deeltjes kunnen in principe vrijkomen:
  - tijdens het spuiten,
  - bij het schoonmaken van de afzuiginstallatie,
  - bij het vullen van de poedervoeder,
  - bij het afvoeren van het afval.

## 8.4 Explosief cladden

De belasting van het milieu is over het algemeen laag. Voor de Arbo dient rekening gehouden te worden met:

- Geluid (explosie);
- Luchtdruk (explosie).

Dit betekent dat de werkplek dient te worden afgeschermd. Door te werken in een vacuumbunker is de belasting op de omgeving aanzienlijk te verlagen. Dit brengt echter hogere kosten met zich mee.

## 8.5 Elektrolytische processen (Galvanotechniek)

Vanuit het oogpunt van milieu moet bij de elektrolytische processen rekening worden gehouden met:

- *Afvalwater.* Dit mag niet zonder meer worden geloosd. Voor de zuivering moet aan strenge eisen worden voldaan. Afvalwater komt onder andere voort uit de spoelbehandelingen die nodig zijn.

- ▶ *Vloeistofdichte vloeren.* In het geval van morsen mag er geen vloeistof door de vloer kunnen dringen.
- ▶ *Afzuiging.* Zowel ruimte-afzuiging als afzuiging bij de baden wordt toegepast. Gezien de gebruikte metalen en metaalzouten kunnen toxische dampen ontstaan. De afgezogen lucht moet worden gesuppleerd. Suppletie via openstaande ramen of aanpalende ruimten is niet toegestaan. De afzuiging moet zodanig zijn, dat in de ruimte waar de werkzaamheden worden uitgevoerd een lichte onderdruk heerst.
- ▶ *Giftige en/of agressieve gassen.* Deze kunnen uit de baden met zoutzuur, salpeterzuur en alle cyanidische baden komen.
- ▶ *Nevel.* Chroombaden, anodiseerbaden en elektrolytische ontvettingbadens geven tijdens gebruik gevaarlijke en hinderlijke nevels af.

## 8.6 Thermische processen

- ▶ Hoge temperatuur (er is sprake van gesmolten metalen).
- ▶ Metaaldampen.

## 9 Voorbeelden van toepassingen

Voor voorbeelden van toepassingen wordt verwezen naar de website [www.coating-online.nl](http://www.coating-online.nl) onder het menu-item "Publicaties".

## 10 Referenties

- [1] Buter, J.E., Th.J. Verheiden: Corrosie en slijtvaste oppervlaktelagen, FME-CWM, VM108, november 1997, ISBN 90-75740-08-5
- [2] Davis, J.R.: Handbook of Thermal Spray Technology, ASM Thermal Spray Society, 2004, ISBN 0-87170-795-0
- [3] FME-CWM: Oppervlaktebehandeling met hoog vermogen lasers, PA.02.13, 2002
- [4] Houben, J.M., D. v.d. Torre: Thermisch Spuiten, FME-CWM, VM95, november 1992, ISBN 90-71306-55-0
- [5] Kim, K.R., C.M. Suh, R.I. Murakami, C.W. Chung: Effect of intrinsic properties of ceramic coatings on fatigue behavior of Cr-Mo-V steels, Surface and Coatings Technology 2003
- [6] Klis, T. van der: Vademecum Oppervlakte technieken metalen, 6e uitgave 2002, VOM, Nieuwegein
- [7] Ros, D., P.P.J. Ramaekers: Toepassing van Thermisch Gespoten Aluminiumlagen, Publicatie CT-project, versie: 0, December 2004
- [8] Torre, D. van der, H. de Vries: Oppervlaktebewerking met de laser, Cladden, legeren en dispergeren, FME-CWM, TI.00.11, oktober 2000
- [9] Tucker, R.C.: Considerations in the Selection of coatings, Advanced Materials & Processes, March 2004 pp 25-28
- [10] Internet site van NEN: [www.nen.nl](http://www.nen.nl)
- [11] Internet site van ITSA: [www.thermalspray.org](http://www.thermalspray.org)
- [12] Internet site van Shockwave Metalworking Technologies BV: [www.smt-holland.com](http://www.smt-holland.com)
- [13] Internet site van TNO-defensie: [www.tno.nl/defensie\\_en\\_veiligheid/defensiekennis\\_en\\_civiele](http://www.tno.nl/defensie_en_veiligheid/defensiekennis_en_civiele)
- [14] Internet site van corrosion doctors: [www.corrosion-doctors.org](http://www.corrosion-doctors.org)
- [15] Internet site over lasrook: [www.lasrook-Online.nl](http://www.lasrook-Online.nl)
- [16] Internet site FNV Bureau Beroepsziekten: [www.bbzfnn.nl](http://www.bbzfnn.nl)
- [17] Internet site Maasdijkmetaaltechnieken nv: [www.maasdijkmetaal.nl](http://www.maasdijkmetaal.nl)
- [18] ASM Handbook: Volume 5, Surface Engineering, 1992
- [19] ASM Handbook: Volume 11, Failure analysis and prevention, 1992
- [20] ASM Handbook: Volume 13, Corrosion, 1992
- [21] TI.05.23 - "Dunne deklagen", FME-CWM 2005, zie ook [www.coating-online.nl](http://www.coating-online.nl)
- [22] VM121 - Hoogvermogen lasers voor het bewerken van metalen; Vereniging FME-CWM; febr. 2002





## Auteur

Deze voorlichtingspublicatie is opgesteld in opdracht van het NIMR in het kader van het project 'Nieuwe coating-technieken voor het MKB'. Hierbij waren de volgende organisaties betrokken:

Federatie Dunne Plaat (FDP), Industrieel Technologie Centrum (ITC), Nederlands Instituut voor Lastechniek (NIL), Netherlands Institute for Metals Research (NIMR), SenterNovem, Syntens en Vereniging FME-CWM.

De auteur, Erik Schuring (ECN) werd ondersteund door een begeleidingsgroep bestaande uit: E. de Jonge (VTS), J. van de Put (Syntens), R. van den Berg (BME Ingenieurs), E.P. Carton (TNO-PML), W. Husslage (Hu\*ge laser BV), W. in den Haak (DMI), P. Boers (FME-CWM), M. de Graaf (FME-CWM), P.P.J. Ramaekers (Rasceur) en G. Vaessen.

## Technische informatie:

Voor technisch inhoudelijke informatie over de in deze voorlichtingspublicatie behandelde onderwerpen kunt u zich richten tot de auteur Erik Schuring (tel.: 0224-564877, e-mail: [schuring@ecn.nl](mailto:schuring@ecn.nl))

## Informatie over, en bestelling van VM-publicaties, Praktijkaanbevelingen en Tech-Info-bladen:

### Vereniging FME-CWM / Industrieel Technologie Centrum (ITC)

Bezoekadres: Boerhaavelaan 40,  
2713 HX ZOETERMEER  
Correspondentie-adres: Postbus 190,  
2700 AD ZOETERMEER  
Telefoon: (079) 353 11 00/353 13 41  
Fax: (079) 353 13 65  
E-mail: [pbo@fme.nl](mailto:pbo@fme.nl)  
Internet: [www.fme-cwm.nl](http://www.fme-cwm.nl)

### Nederlands Instituut voor Lastechniek (NIL)

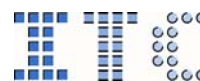
Adres: Krimkade 20,  
2251 KA VOORSCHOTEN  
Telefoon: (071) 560 10 70  
Fax: (071) 561 14 26  
E-mail: [info@nil.nl](mailto:info@nil.nl)  
Internet: [www.nil.nl](http://www.nil.nl)



Netherlands Institute  
for Metals Research



Federatie  
dunne plaat



SenterNovem



FME CWM



© Vereniging FME-CWM/november 2005 - 03

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

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

Vereniging FME-CWM  
afdeling Technische Bedrijfskunde  
Postbus 190, 2700 AD Zoetermeer  
telefoon 079 - 353 11 00  
telefax 079 - 353 13 65  
e-mail: [pbo@fme.nl](mailto:pbo@fme.nl)  
internet: [www.fme-cwm.nl](http://www.fme-cwm.nl)