

Nieuwe coatingtechnieken voor het MKB

Dikke deklagen

Oplassen, thermisch spuiten, explosiefcladden, lasercladden, electrolytische en stroomloze processen

E.W. Schuring

Gepubliceerd op www.coating-online.nl (2005)

CT project

Publicatie:

**Dikke deklagen op metallische ondergronden
Oplassen, thermisch spuiten, explosiefcladden,
lasercladden, elektrolytische en stroomloze
processen**



Auteurs:

- E.W. Schuring
(ECN-Technologische Services & Consultancy)
- E.P. Carton
(TNO-PML)
- W. Husslage
(Hu*ge laser BV)
- R.W.A. van den Berg
(BME Ingenieurs)

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

Versie: 3.0

Datum: Maart 2005

Verantwoording

Dit rapport is opgesteld in opdracht van NIMR in het kader van het project 'Nieuwe coatingtechnieken voor het MKB'. Het onderzoek is uitgevoerd onder ECN projectnummer 7.3492. Dit rapport zal tevens geplaatst worden op de website van het project: www.coating-online.nl als FME/CWM Tech-Info-blad nr TI.05.24.

Dankzegging

Dankzegging aan de begeleidingsgroep die heeft meegewerkt aan het totstandkomen van deze publicatie bedanken voor hun deelname. De begeleidingsgroep bestond uit:

E. de Jonge (VTS), J. van der Put (Syntens), R. van der Berg (BME), E.P. Carton (TNO), W. Husslage (Hu*ge laser BV), W. in den Haak (DMI), M. de Graaf (FME), G. Vaessen.

Verder dankzegging aan het Netherlands Institute for Materials Research (NIMR) dat deze publicatie mede mogelijk heeft gemaakt.

Abstract

This publication is a part of in total 5 publications produced in the framework of the knowledge transfer project 'New Coating technologies for Medium and Small Enterprises' initiated by FME/CWM and the Netherlands Institute for Materials Research, NIMR.

In this publication coating techniques for the application of thick coatings on hard surfaces are discussed. Because of the wide variety of coating technologies these are limited to surfacing, thermal spraying, explosive cladding, laser cladding, galvanising, electroless plating and hot dip processes, producing coatings of 10 µm thickness and thicker, up to 10 mm.

The aim of the publication is to inform medium and small enterprises about coating possibilities referring to coating functionality: corrosion resistance, wear resistance, possibilities of repair, aesthetic aspects. These are addressed in relation to design aspects. Also the possibilities and limitations of the coating techniques are discussed.

In addition to this publication, selection tables were made. These are attached in the appendix but can also be addressed as an excell file on the website www.coating-online.nl.

All publications and information will be published on the internet website of this project: www.coating-online.nl. Downloading is free of charge. This publication will be published as FME/CWM Tech-Info-sheet nr TI.05.24.

Trefwoorden

Deklaagtechnologie, dikke deklagen, thermisch spuiten, oplassen, explosief cladden, laser cladden, galvaniseren, thermische processen, stroomloos metalliseren, functionaliteit, ontwerpaspecten, selectie van deklagen

Inhoud

Lijst van tabellen	6
Lijst van figuren	6
SAMENVATTING	9
1. Inleiding	11
1.1 Project 'Nieuwe coatingtechnieken voor het MKB'	11
1.2 Selectie van dikke deklagen	12
2. Positionering van het project in de Oppervlakte Engineering	15
3. Functionaliteit van de deklaag	17
3.1 Vermoeiingssterkte	18
3.2 Reparatie	20
3.3 Isolerende en geleidende coatings	21
3.3.1 Thermische isolatie	21
3.3.2 Elektrische isolatie/geleiding	23
3.4 Slijtvastheid	23
3.5 Corrosievastheid	26
3.5.1 Natte (elektrochemische) corrosie	29
3.5.2 Hoge temperatuur (gas)corrosie	34
3.6 Esthetische deklagen	35
4. Gebruikscondities waaronder de deklaag moet functioneren	37
5. Ontwerpaspecten bij de keuze van een deklaagtechniek	39
6. Keuze van een deklaagtechniek	41
6.1 Introductie	41
6.2 Oplassen	43
6.2.1 Oplaskarakteristieken	43
6.2.2 Eigenschappen van opgelaste deklagen	43
6.2.3 Elektroslassen met band	45
6.2.4 PPAW	47
6.2.5 Toepassing voor Poeder Plasma oplassen	49
6.3 Lasercladden	49
6.3.1 Uitvoering lasercladden	50
6.3.2 Functionele eigenschappen van een lasercladlaag	52
6.3.3 Ontwerpaspecten voor een lasercladlaag	52
6.4 Thermisch spuiten	53
6.4.1 Korte omschrijving diverse thermische spuitprocessen	54
6.4.2 Eigenschappen thermisch spuitproces	58
6.4.3 Functionele eigenschappen thermisch gespoten deklaag	59
6.4.4 Ontwerpaspecten bij het thermisch spuiten	60
6.4.5 Toepassingsvoorbeelden	63
6.5 Explosief cladden	63
6.5.1 Het explosief cladproces	64
6.5.2 Explosief cladden met dikke plaat	65
6.5.3 Explosief cladden van metaalfolies	66
6.5.4 Ontwerpaspecten bij explosief cladden	68
6.5.5 Voorbeelden van explosief cladden	68
6.6 Elektrochemische of elektrolytische processen	69
6.6.1 Functionele eigenschappen	70
6.6.2 Ontwerpaspecten	71
6.7 Stroomloze metaalafscheiding	72

6.7.1	Ontwerpaspecten	73
6.7.2	Voorbeelden toepassingen	74
6.8	Badprocessen	74
6.8.1	Ontwerpaspecten bij thermisch verzinken en aluminiseren	75
7.	Kostenaspecten	79
7.1	Overwegingen bij het opmaken van de kostenvergelijking:	79
7.1.1	Ontwerp	79
7.1.2	Proceskosten	80
7.1.3	Onderhoudskosten bij de selectie van een deklaag	82
7.1.4	Operationele kosten	83
7.1.5	Verwijderingskosten	83
7.1.6	Milieukosten	84
8.	Normen en normering	85
8.1	Algemene normen	85
8.2	Oplassen	86
8.3	Lasercladden	87
8.4	Explosief cladden	87
8.5	Electrolytische processen	87
8.6	Thermisch spuiten	88
9.	Milieu en arbo-aspecten	89
9.1	Oplassen	89
9.2	Lasercladden	90
9.3	Thermisch spuiten	91
9.4	Explosief cladden	91
9.5	Elektrolytische processen (Galvanotechniek)	92
9.6	Badprocessen	92
10.	Voorbeelden van toepassingen	93
10.1	Oplassen	93
10.2	Lasercladden	94
10.3	Explosief cladden	97
10.4	Galvanische processen	99
10.5	Thermisch spuiten	100
	Referenties	103
Bijlage A	Selectietabellen, Toelichting	105
Bijlage B	Selectietabel Functionaliteit	107
Bijlage C	Selectietabel ontwerpaspecten	109
Bijlage D	Selectietabel coatingtype tegen functionaliteit	111
Bijlage E	Selectietabel coatingtype tegen aanbrengtechniek	113
Bijlage F	Selectietabel overige aspecten	115

Lijst van tabellen

Tabel 2.1	<i>Behandelde deklaagtechnieken in het project 'Nieuwe coatingtechnieken voor het MKB'</i>	15
Tabel 3.1	<i>Vermoeingsmechanismen en parameters die deze mechanismen beïnvloeden</i>	18
Tabel 3.2	<i>Deklaagtechniek voor reparatietoepassingen</i>	21
Tabel 3.3	<i>Overzicht van slijtage mechanismen en materiaal-, oppervlakte- en milieuparameters die een rol spelen</i>	24
Tabel 3.4	<i>Overzicht van corrosiemechanismen en materiaal, milieu, proces en ontwerpaspecten</i>	28
Tabel 4.1	<i>Indeling gebruikscondities</i>	37
Tabel 5.1	<i>Ontwerpaspecten bij de keuze van een deklaag</i>	39
Tabel 6.1	<i>Overzicht behandelde deklaagtechnieken</i>	41
Tabel 6.2	<i>Samenvatting van de karakteristieken van deklaagtechnieken in relatie tot de functionele eigenschappen</i>	42
Tabel 6.3	<i>Karakteristieken van de verschillende technieken voor het aanbrengen van deklagen</i>	43
Tabel 6.4	<i>Classificatie lastoevoegmaterialen opgelaste slijtvaste deklagen</i>	44
Tabel 6.5	<i>Voor- en nadelen van het elektroslaklassen met band</i>	46
Tabel 6.6	<i>Karakteristieken van de verschillende thermisch spuitprocessen</i>	55
Tabel 6.7	<i>Voor en nadelen van explosief cladden</i>	66
Tabel 6.8	<i>Functionaliteit van elektrochemisch en stroomloos aangebrachte metallische deklagen</i>	70
Tabel 6.9	<i>Metalen, waarbij stroomloze metaalafscheiding mogelijk is (VOM Vademecum, 2002).</i>	73
Tabel 6.10	<i>Parameters en aspecten bij thermische badprocessen</i>	77
Tabel 9.1	<i>Vergelijking tussen de kosten voor het coaten per deklaagtechniek</i>	80
Tabel 9.2	<i>Voorbeeld van proceskostenberekening voor het elektroslaklassen met band</i>	80
Tabel 9.3	<i>Relatieve proceskosten en deklaagkarakteristiek per thermisch spuittechniek (Davis J.R., 2004)</i>	81

Lijst van figuren

Figuur 1.1	<i>Schematische voorstelling keuze en ontwerpproces bij deklagen</i>	13
Figuur 2.1	<i>Scala van technieken in de Oppervlakte-engineering en de positionering van deze publicatie</i>	16
Figuur 3.1	<i>Opdeling naar functionaliteit gevraagd van de bulk en het oppervlak</i>	17
Figuur 3.3	<i>Correctiefactoren voor het aantal wisselingen (N) tot breuk, afhankelijk van de oppervlakteruwheid [ASM Handbook, Vol 11]</i>	19
Figuur 3.4	<i>Indicatie voor de thermische geleidbaarheid van YSZ afhankelijk van de dichtheid ..</i>	22
Figuur 3.5	<i>Temperatuurval van 1,1-1,3 mm dikke ZrO₂ deklagen op een 3,2 mm dikke plaat IN718(een nikkelbasis legering), afhankelijk van de dichtheid van de deklaag. Piektemperatuur: 1400°C De nummers verwijzen naar verschillende deklagen (ASM Handbook vol 5, 1992)</i>	22
Figuur 3.6	<i>Indeling naar slijtagemechanisme</i>	23
Figuur 3.8	<i>Indeling van corrosiemechanismen</i>	27
Figuur 3.10	<i>Galvanische reeks voor metalen in zeewater. Dichte vlakken betreffen actief gedrag van het betreffende materiaal onder condities van een slechte beluchting (laag zuurstofgehalte) (ASM Handbook, vol 13 1992)</i>	31

Figuur 3.11	<i>Relatieve weerstand tegen putvormige aantastingen spleetcorrosie in relatie tot het Chroom en Molybdeengehalte (Buter, J.E. et al, 1997)</i>	33
Figuur 6.1	<i>Principeschema elektroslaklassen met band</i>	45
Figuur 6.2	<i>De overlap (4-8 mm)</i>	46
Figuur 6.3	<i>Opstelling van het elektroslaklassen met band</i>	47
Figuur 6.4	<i>Principe PPAW</i>	47
Figuur 6.5	<i>Poederdoseerapparatuur en een detailopname van de ronddraaiende schijf met schraper</i>	49
Figuur 6.6	<i>Schematische voorstelling van het lasercladden</i>	50
Figuur 6.7	<i>Schematische voorstelling coaxiale nozzle bij lasercladden</i>	51
Figuur 6.8	<i>Inwendig lasercladden van een 1/2" plugafsluiter (NedClad)</i>	53
Figuur 6.9	<i>Schematische weergaven van het thermisch spuitproces</i>	54
Figuur 6.10	<i>Overzicht van thermisch spuitprocessen ten opzicht van de thermische en kinetische energie van toevoegmateriaal</i>	56
Figuur 6.11	<i>Principe van cold spray</i>	57
Figuur 6.12	<i>Thermisch spuiten, richtlijnen aangaande de vorm en geometrie van op te spuiten materialen</i>	62
Figuur 6.13	<i>Schematische voorstelling van het explosief clad-proces. (bron: TNO Defensie en Veiligheid)</i>	64
Figuur 6.14	<i>Schematische weergave van de opstelling voor het explosief cladden van een metalen staaf (bron: TNO Defensie en Veiligheid)</i>	65
Figuur 6.15	<i>Voorbeelden van mogelijke materiaalcombinaties met explosief cladden (internetsite smt)</i>	66
Figuur 6.16	<i>Bekleding van titanium plaat met een folie van een nikkel-legering (Hastelloy X) met een Vanadium tussenlaag als diffusiebarriere die de vorming van brosse TiNi-fasen tegengaat.</i>	67
Figuur 6.17	<i>Tampongalvaniseren, principe (bron: Maasdijk Metaal)</i>	70
Figuur 6.18	<i>Relatie tussen de zinklaagdikte, aluminiumlaagdikte en de levensduur. Ter vergelijking zijn de gewenste laagdikte voor thermisch gespoten aluminium weergegeven (ASM Handbook Vol 5, 1992; Ros, D, 2004)</i>	75

SAMENVATTING

In opdracht van Netherlands Institute for Metals Research (NIMR) en onder verantwoording van FME/CWM wordt het project 'Nieuwe coatingtechnieken voor het MKB' uitgevoerd. Doelstelling is het MKB te informeren over mogelijkheden van deklaagtechnologie zodat zij inzicht krijgen in de potentie van deklagen voor hun markt. Binnen het genoemde project verschijnen nog een viertal rapporten. De resultaten zullen uiteindelijk op de website van het project, www.coating-online.nl, worden gepubliceerd als FME/CWM Tech-Info-bladen. Dit rapport verschijnt onder het nummer TI.05.024.

Dit rapport geeft een overzicht van deklaagtechnieken voor het aanbrengen van metallische deklagen op doorgaans harde ondergronden. Vanwege het brede scala aan mogelijkheden is een beperking aangebracht in het aantal technieken. De behandelde deklaagtechnieken zijn: oplassen, laser cladden, thermisch spuiten, explosief cladden, galvanische technieken, stroomloze metaalafscheiding en thermische processen (hot dip). Een verdere beperking is dat alleen deklagen dikker dan 10 µm behandeld worden.

Het doel is de lezers een indruk te geven van de potentie van deklagen, zonder technische details over de technieken naar voren te brengen. In dit rapport wordt daarom primair ingegaan op de functionaliteit die deklagen aan een product kunnen geven. Onder functionaliteit wordt daarbij verstaan: corrosievastheid, slijtvastheid, reparatie mogelijkheden van de technieken. De functionaliteit wordt daarbij van het oppervlak van een basismateriaal gevraagd. Verder wordt ingegaan op de invloeden van de aanbrengtechniek op de mechanische eigenschappen van de basismaterialen zoals vermoeiingssterkte, introductie van (rest)-spanningen en (trek)sterkte.

Om een keuze voor een deklaagtechniek te kunnen maken moet men op de hoogte zijn of in elk geval inzicht hebben in de mogelijke beperkingen en mogelijkheden van de deklagen en de deklaagtechniek. Daarom wordt ingegaan op de ontwerpaspecten die een rol spelen. Het gaat daarbij om zaken als thermische beïnvloeding door de deklaagtechniek, de mogelijkheid of onmogelijkheid de deklaag inwendig aan te brengen, welke materialen (metallisch, cermet of keramisch) kan met een deklaagtechniek worden aangebracht.

Het rapport wordt ondersteund met voorbeelden en een serie selectietabellen. Deze selectietabellen zijn in dit rapport opgenomen als bijlagen, maar zijn tevens afzonderlijk te raadplegen in de vorm van een excell-spreadsheet op de website www.coating-online.nl.

Aan de hand van dit rapport krijgt de lezer een indruk van de mogelijkheden van deklaag technieken. Het rapport beoogt niet de lezer de oplossing voor zijn probleem te geven, doch hem een denktrant voor te leggen welke tot een oplossingsrichting leidt. Voor de uiteindelijke oplossing zal overlegt moeten worden met ter zake deskundigen. Via de genoemde website zijn deze snel toegankelijk.

1. Inleiding

1.1 Project 'Nieuwe coatingtechnieken voor het MKB'

Toepassing van de juiste oppervlakte (voor)behandeling(en) kan een product of materiaal specifieke en essentiële (aanvullende) functionele eigenschappen geven. Het betreft dan altijd een functionaliteit die van het oppervlak verlangd wordt. Het geven van specifieke eigenschappen aan een oppervlak kan worden samengevat onder 'Oppervlakte-engineering'. Dit begrip omvat een groot aantal oppervlaktetechnieken, zoveel dat veel constructeurs/ontwerpers, werkvoorbereiders en gebruikers hierover geen zicht (meer) hebben. Dit, terwijl met name de constructeur en ontwerper en werkvoorbereider een bepalende factor zijn in de materiaalkeuze en selectie van deklagen. Vaak blijft daardoor de keuze beperkt tot een klein aantal, aan de betreffende constructeur/ontwerper en werkvoorbereider, bekende technieken. Dit kan ertoe leiden dat niet de meest economische of technisch beste oplossing gekozen wordt. Dit probleem is onderkend door de Vereniging FME-CWM en het Netherlands Institute for Metals Research (NIMR) en was de reden tot het starten van een het project '*Nieuwe coatingtechnieken voor het MKB*'.

Doel van het project is te komen tot kennisoverdracht betreffende 'nieuwe' deklaagtechnieken en toepassing en zo een hulpmiddel te zijn voor met name de constructeur/ontwerper en werkvoorbereider. Met deze kennisoverdracht wordt een oplossingsrichting voor specifieke problemen gegeven. De benadering is daarbij vanuit de gewenste functionaliteit van de deklaag dan wel het product. Het is niet de bedoeling uitputtend in te gaan op de verschillende coatingtechnieken maar meer op de toepassingsmogelijkheden van de verschillende coatings. Voor diepte-informatie over de technieken wordt verwezen naar reeds beschikbare literatuur en naar experts op het gebied van de verschillende deklaagtechnieken.

Binnen het project is gekozen voor een hoofdindeling naar laagdikte te maken, te weten:

- Dunne deklagen. Dit zijn deklagen tot ca 10 µm, waaronder de technieken als PVD en CVD vallen.
- Dikke deklagen. Dit zijn deklagen dikker dan 10 µm, hieronder vallen onder andere thermisch spuiten, oplassen, lasercladden en explosiefcladden. Maar ook galvanisch en stroomloos aangebrachte deklagen.

Dit is een arbitraire keuze met als doel de te behandelen technieken te verdelen en geeft geen indeling naar toepassingsgebied of functionaliteit van de verschillende deklagen. Aanvullend op deze hoofdindeling verschijnen tevens publicaties met de onderwerpen:

- Thermisch gespoten aluminium deklagen.
- Deklagen op dunne plaat.
- Kwaliteitsaspecten bij het toepassen van (harde) deklagen.

In deze publicatie wordt ingegaan op het onderwerp Dikke en mega-dikke deklagen waarbij de laagdikte kan variëren tussen 10 µm en 10 mm. Deze deklagen kunnen aangebracht worden door middel van thermisch spuiten, oplassen, explosief cladden, laser cladden en elektrolytische en thermisch deklaagtechnieken. Daarbij staat de functionaliteit van een deklaag centraal. In deze publicatie zal slechts beperkt worden ingegaan op het proces waarmee een deklaag wordt aangebracht. Hiervoor wordt verwezen naar uitgebreide literatuur, waaronder voor oplassen en thermisch spuiten VM95 en VM108. Voor lasercladden is FME/CWM ti.001.11 beschikbaar en voor elektrolytische en thermische stroomloze processen de VOM Vademecum. Deze publicaties zijn te downloaden vanaf de FME/CWM website <http://www.coating-online.nl>.

1.2 Selectie van dikke deklagen

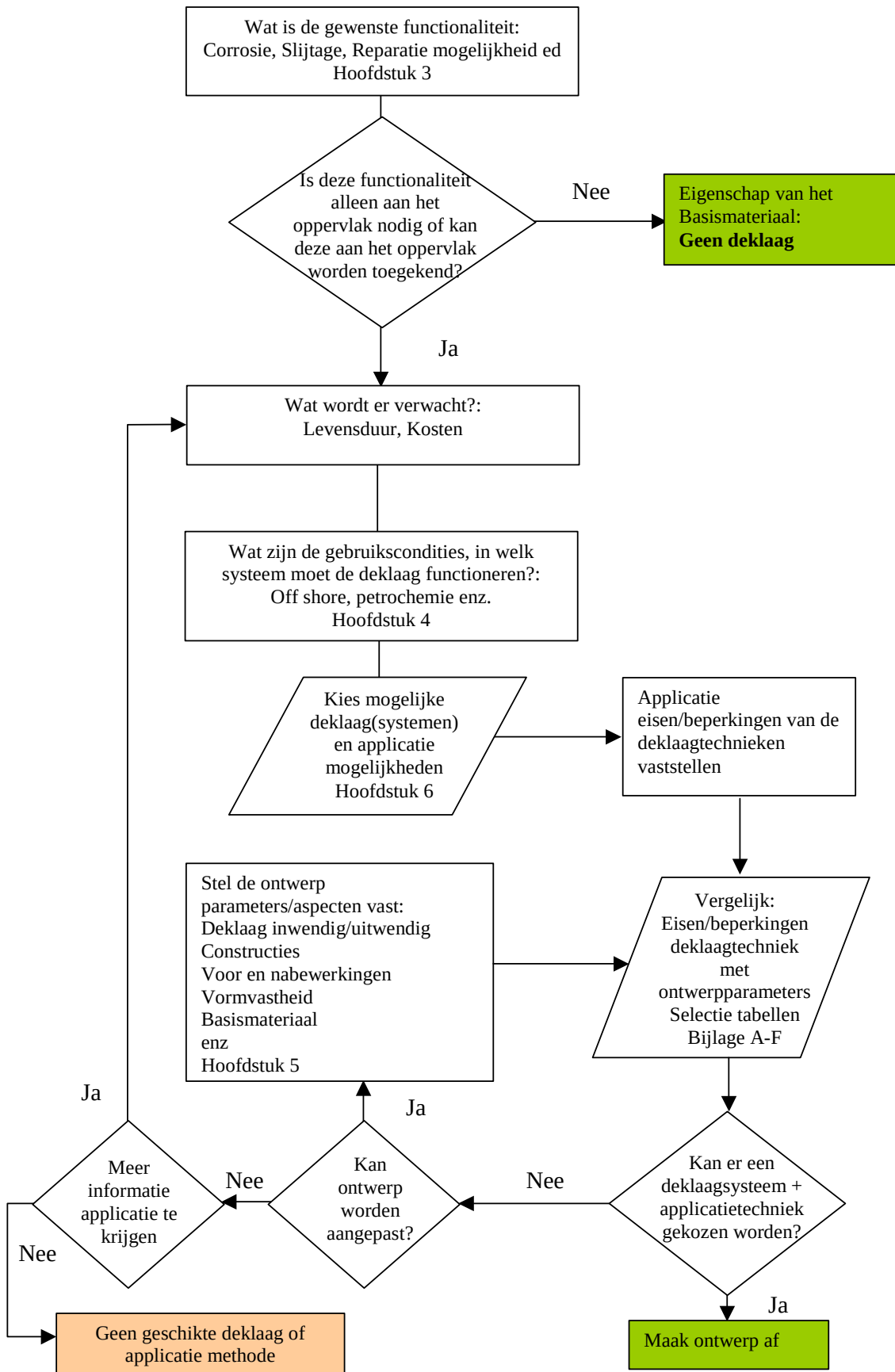
Zoals al aangegeven omvat 'Oppervlakte-engineering' een breed scala aan technieken. Binnen dit project kan geen compleet overzicht gegeven worden. Op basis van een binnen het project uitgevoerd marktonderzoek is daarom een keuze gemaakt voor een aantal technieken.

In het volgende Hoofdstuk 2 wordt eerst kort ingegaan op het brede scala aan technieken in de Oppervlakte-engineering en de positionering van dit project daarin. In de daarop volgende hoofdstukken wordt achtereenvolgens ingegaan op het selectieproces voor een deklaag. Dit is onder te verdelen in:

- Vaststellen van de gewenste functionaliteit. De deklaag moet een probleem oplossen. Hoofdstuk 3.
- 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. Hoofdstuk 4
- 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 men hiermee rekening houden bij het ontwerp. Deze informatie is van essentieel belang voor de ontwerper/constructeur, Hoofdstuk 5.
- Keuze van de deklaagtechniek. Deze publicatie beperkt zich daarin tot de Dikke Deklagen. In dit hoofdstuk wordt ingegaan op een aantal van deze deklaagtechnieken. 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. Hoofdstuk 6 en Hoofdstuk 7.
- Milieu- en Arbo-aspecten. Hoofdstuk 9.

Voor een belangrijk deel worden deze onderwerpen aan de hand van keuzematrices of selectietabellen ondersteund. Deze matrices geven op een indicatieve wijze de toepasbaarheid van de verschillende deklaagtechnieken in relatie tot ontwerpaspecten, gebruikscondities en functionaliteit aan. De ontwerper/constructeur kan zo snel een eerste selectie 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.



Figuur 1.1 Schematische voorstelling keuze en ontwerpproces bij deklagen

2. Positionering van het project in de Oppervlakte Engineering

Oppervlakte-engineering heeft tot doel de prestaties van materialen, uitgedrukt in termen van levensduur, kostprijs, toepasbaarheid en uiterlijk, te verbeteren met een oppervlaktebehandeling. Binnen de oppervlakte-engineering is daarvoor een breed scala aan oppervlaktebehandelingstechnieken en deklagen beschikbaar. Het totale systeem, materiaalkeuze-bedrijfscondities-milieu, waarin een onderdeel of installatie wordt toegepast bepaalt, in combinatie met de gewenste functionaliteit, de keuze voor een bepaalde oppervlaktebehandeling of deklaag. Op deze keuzes wordt later in deze publicatie ingegaan.

Grofweg kunnen de technieken die ter beschikking staan worden onderverdeeld in drie categorieën, Figuur 2.1:

- 1) Technieken ter voorbereiding van een oppervlak voorafgaand aan de behandeling (bijvoorbeeld reinigen en gritten).
- 2) Technieken waarbij het oppervlak van een materiaal wordt gemodificeerd. Dit kan dan gaan om de topografie (bijvoorbeeld elektrolytisch polijsten), chemische samenstelling of microstructuur (bijvoorbeeld met diffusieprocessen).
- 3) Technieken waarbij het oppervlak wordt voorzien van een deklaag met de gewenste functionaliteit (bijvoorbeeld organische deklagen en oplassen)

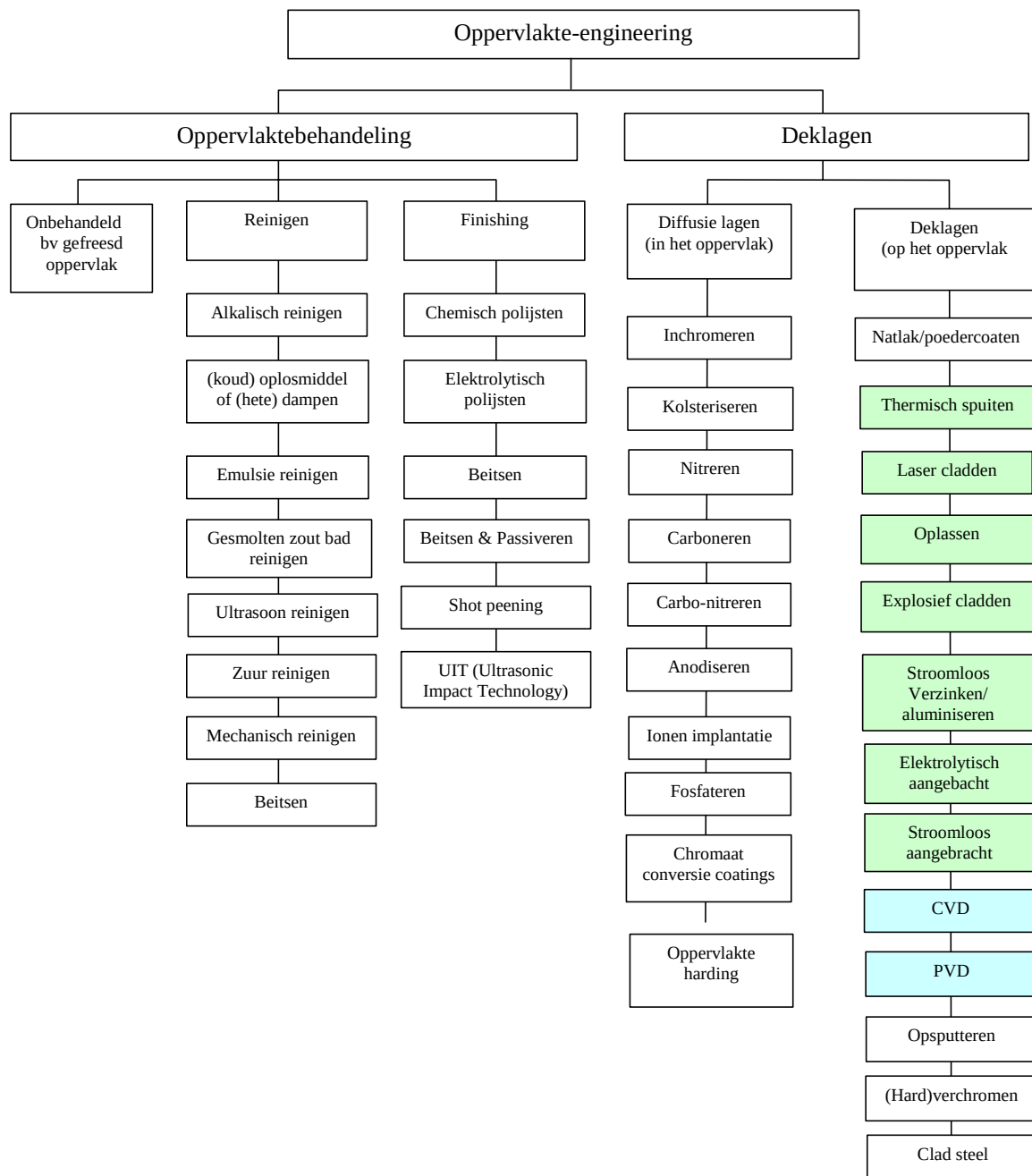
Dit totale pallet aan oppervlaktebehandelingen is te breed om hier te behandelen. Daarom is hierin een keuze gemaakt. Figuur 2.1 geeft een overzicht waarin een opdeling is gemaakt in oppervlaktebehandelingen en deklagen zoals hierboven beschreven. Vervolgens wordt een overzicht gegeven van een aantal technieken en methoden.

In dit project '*Nieuwe coatingtechnieken voor het MKB*' wordt alleen ingegaan op deklagen die op een oppervlak worden aangebracht, de derde categorie. Daarin is een verdere beperking gemaakt tot de volgende deklaagtechnieken, Tabel 2.1. Deze technieken staan aangegeven met gekleurde vlakken in Figuur 2.1.

Tabel 2.1 *Behandelde deklaagtechnieken in het project 'Nieuwe coatingtechnieken voor het MKB'*

Dikke deklagen:	Dunne deklagen:
• Oplassen • Laser cladden • Thermisch spuiten • Explosief cladden • Elektrolytisch aangebrachte deklagen • Stroomloos verzinken/aluminiseren	• CVD (Chemical Vapour Deposition) • PVD (Physical Vapour Deposition)

De in deze publicatie behandelde technieken staan in groen aangegeven.



Figuur 2.1 *Scala van technieken in de Oppervlakte-engineering en de positionering van deze publicatie*

3. Functionaliteit van de deklaag

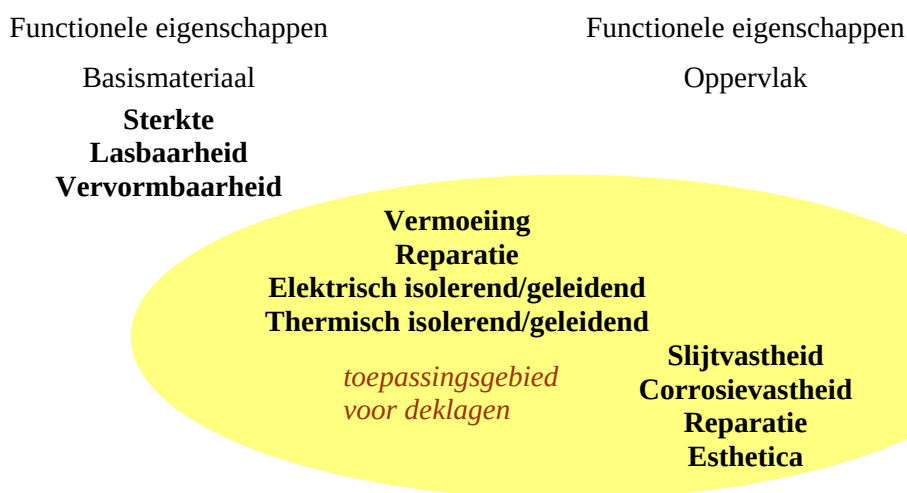
Voordat een deklaag gekozen kan worden moet eerst vastgesteld worden welke functionaliteit van de deklaag verwacht wordt. Daarvoor is het belangrijk te definiëren wat onder functionaliteit wordt verstaan. In deze publicatie wordt onder functionaliteit van een deklaag verstaan:

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.
- Goed omschreven moet zijn wat de gebruikscondities zijn.
- Er duidelijkheid moet bestaan over de verwachte levensduur/gebruikstermijn.

De applicatie vraagt aan het oppervlak van het product bepaalde functionele eigenschappen. Deze eigenschappen zijn in te delen naar eigenschappen die van het basismateriaal gevraagd worden en eigenschappen die specifiek van het oppervlak gevraagd worden, Figuur 3.1. Daarnaast zijn er functionele eigenschappen die op basis van gelijkwaardigheid zowel door het basismateriaal als het oppervlak vervuld kunnen worden, zie Figuur 3.1. Het basismateriaal kan vaak de functionele eigenschappen van het oppervlak leveren. Echter, als van een product zowel basismateriaaleigenschappen als oppervlakte-eigenschappen worden gevraagd, dan moet doorgaans een compromis worden gevonden. Dit kan leiden tot een niet optimale materiaalkeuze of ontwerp en daarmee tot bijvoorbeeld onnodig hoge kosten. Een optimaal ontwerp en materiaalkeuze vragen daarom om functioneel gescheiden ontwerpen.



Figuur 3.1 Opdeling naar functionaliteit gevraagd van de bulk en het oppervlak

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, echter kan deze wel beïnvloeden.

3.1 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 [Metals Handbook Vol 5].

Het vermoeiingsproces is onder te verdelen in een drietal fasen:

- 1) Initiatiefase, waarin de scheur wordt gevormd.
- 2) Groeifase, waarin de scheur doorgroeit tot een afmeting waarbij de resterende doorsnede de hoogste belasting niet meer kan opnemen.
- 3) Falen van het onderdeel onder 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 is bij een goed ontwerp 80-90% van de levensduur. Daarmee is vermoeiing deels te karakteriseren als een functionaliteit die van het oppervlak gevraagd wordt.

Vermoeiing kan optreden onder:

- *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 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. Figuur 3.2 geeft een overzicht van vermoeiingsmechanismen en de belangrijkste parameter; materiaaleigenschappen, milieu en proces, die een rol spelen bij deze mechanismen.

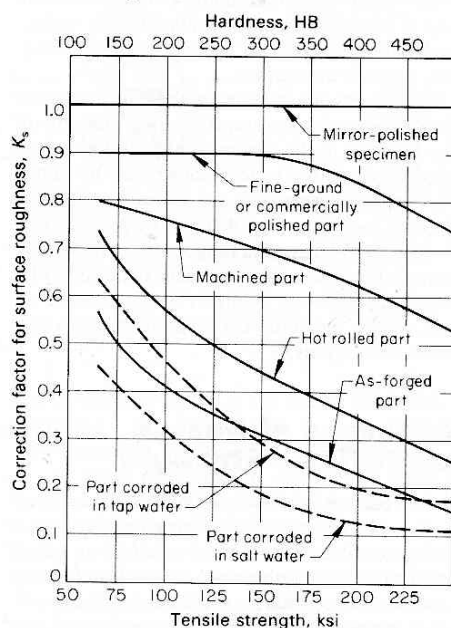
Tabel 3.1 *Vermoeiingsmechanismen en parameters die deze mechanismen beïnvloeden*

Parameter	Vermoeiingsmechanisme			
	Mechanisch	Corrosie	Thermisch	Mechanisch/ Thermisch
Max spanning				
Spanningsamplitude				
Oppervlakteruwheid				
Oppervlaktedefecten				
Interne (rest) trekspanningen	verlaagd vermoeiingsgrens			
Interne (rest) drukspanningen	verhoogd vermoeiingsgrens			
Spanningsconcentraties				
Corrosiegevoeligheid		verkort initiatiefase		
Thermisch uitzettingscoëfficiënt (verschillen in)				
Reksterkte				

Mechanische vermoeiing

De mechanismen van mechanische vermoeiing zijn uitgebreid beschreven in de open literatuur. Daarom wordt daar hier niet in detail op ingegaan. Voor de selectie van een deklaag is het wel van belang inzicht te hebben in factoren die scheurinitiatie beïnvloeden omdat deze in het ontwerp meegenomen moeten worden. Factoren die scheurinitiatie versnellen of beïnvloeden zijn:

- Hoogte van de spanning en spanningsamplitude.
- Spanningsconcentraties, onder andere bij scherpe overgangen.
- Ruwe oppervlakken. De oppervlakteruwheid beïnvloedt de vermoeiingssterkte van materialen. Ook voor ruwe deklaagen geldt dat deze bij voorkeur nabewerkt zouden moeten worden als de constructie onder een wisselende belasting staat die boven de vermoeiingsbelasting gaat. Als voorbeeld kan een gefreesd oppervlak dienen. Het aantal wisselingen, N , ligt bij een gefreesd oppervlak op 55-80% van het aantal wisselingen tot breuk zoals bepaald in een standaard vermoeiingstest aan gepolijste oppervlakken, zie Figuur 3.3.
- Oppervlaktedefecten, zoals hardingsscheuren, warscheuren in lassen. Oppervlaktedefecten kunnen vaak met reparatietechnieken worden hersteld. Repareren met een deklaagtechniek is daarbij een van de opties.
- Trekspanningen in het oppervlak. Trekspanningen gebruiken een deel van de beschikbare sterkte van het materiaal, waardoor een lager belastingniveau voor bedrijf overblijft. Trekspanning kunnen op veel manieren in een constructie ontstaan. Bedrijfscondities kunnen deze opleggen, maar ook tijdens de productie, bijvoorbeeld lassen, kunnen restspanningen achterblijven. Het aanbrengen van drukspanningen in het oppervlak verhoogt de vermoeiingssterkte van het materiaal/onderdeel aanzienlijk. Het aanbrengen van een deklaag met inherente drukspanningen kan een oplossing bieden. Andere oppervlakbehandelingen die sterke verbeteringen geven zijn shot-peening, rollen en UIT (Ultrasonic Impact Technology). Met thermisch spuiten met HP-HVOF is het mogelijk drukspanningen in de deklaag te creëren. Met explosief cladden ontstaan hoge drukspanningen in de deklaag, wat zeer gunstig is voor de vermoeiingseigenschappen.
- Lasverbindingen op locaties met spanningsconcentraties.
- Een hoge treksterkte van het materiaal verhoogt doorgaans de vermoeiingssterkte. Van harde keramische deklaagen is gerapporteerd dat deze de scheur-initiatiefase in het basismateriaal verlengen (Kim, 2003)



Figuur 3.2 Correctiefactoren voor het aantal wisselingen (N) tot breuk, afhankelijk van de oppervlakteruwheid [ASM Handbook, Vol 11]

Onder drukbelasting, die kan optreden onder bijvoorbeeld rollende belasting, kan in een oppervlak zogenaamde oppervlaktevermoeiing optreden. Dit is een vorm van slijtage en zal daarom nader onder het hoofdstuk slijtage aan de orde komen.

Corrosievermoeiing

Bij corrosievermoeiing speelt een corrosieproces in meer of mindere mate een rol in vooral de scheur-initiatiefase. Een corrosieve aantasting van een oppervlak leidt tot oppervlakteverruwing (bijvoorbeeld putvormige corrosie) of er ontstaat het begin van een scheur (bijvoorbeeld interkristallijne corrosie). Een ander proces is de inwerking van corrosie op het ontstaan van de vermoeiingsscheur. Tijdens vermoeien vindt op microschaal een plastische vervorming van het materiaal plaats. Normaal herstellen kleine defecten doordat het materiaal weer metallische contact maakt. Het optreden van corrosie verstoort dit mechanisme en de scheur ontstaat in feite al bij de eerste cyclus. Dit kan leiden tot meer dan een halvering of zelfs volledig te niet doen van de initiatiefase door de corrosiecomponent. Een deklaag met voldoende corrosiewerende eigenschappen kan hier uitkomst bieden.

Thermische vermoeiing

Thermische vermoeiing is een faalmechanisme dat op kan treden onder (sterk) wisselende thermische belastingen. Of thermische vermoeiing optreedt hangt sterk af van:

- De lineaire uitzettingcoëfficiënt, α , van het basismateriaal.
- Verschillen in lineaire uitzettingcoëfficiënt tussen twee of meer materialen die aan elkaar verbonden zijn.
- Mogelijkheden en beperkingen in vrije uitzetting vanuit het ontwerp, (hoge) constraint.

De toepassing van deklagen met een groot verschil in lineaire uitzettingscoëfficiënt tot het basismateriaal, verhogen de kans op falen van de deklaag onder thermisch wisselende belastingen. Op het grensvlak tussen deklaag en basismateriaal ontstaan hoge mechanische spanningen, afschuifspanningen, waardoor falen op dit grensvlak kan optreden.

Bij het toepassen van deklagen met een groot verschil in thermische uitzettingscoëfficiënt met het basismateriaal, kan de mechanische spanning worden afgebouwd door een gelaagde opbouw van de deklaag te creëren. In deze gelaagde opbouw kan dan:

- Een verloop in uitzettingscoëfficiënt worden ingebouwd.
- Een deklaag worden opgenomen die de oplegde spanning kan opnemen in de vorm van plastische vervorming.
- Een zodanig structuur in de deklaag aanbrengen waardoor deze kan vervormen. Daarbij kan gedacht worden aan micro-scheurtjes en poriën. Een voorbeeld hiervan wordt gegeven bij de toepassing van zogenaamde thermal barrier coatings, TBC's in 0.

3.2 Reparatie

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

- Herstel van 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 situaties waarbij min of meer gewenste 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 kan reparatie op locatie of in een werkplaats plaatsvinden. In het laatste geval zal duidelijk zijn dat de kwaliteit hoger kan liggen, reden waarom reparatie in een werkplaats de voorkeur heeft.

Voor de reparatie komen verschillende deklaag technieken in aanmerking, zie Tabel 3.1. Bij een keuze voor een reparatietechniek moet uiteraard rekening gehouden worden met de functionaliteit en ontwerpaspecten.

Tabel 3.2 Deklaagtechniek voor reparatietoepassingen

Techniek	op locatie	laagdikten [mm]
laser cladden	N	0,1-3
oplassen	J	2-10
thermisch spuiten	J	0,1-5
Elektrolytisch	N	
<i>tampongalvaniseren</i>	J	0,05-1

3.3 Isolerende en geleidende coatings

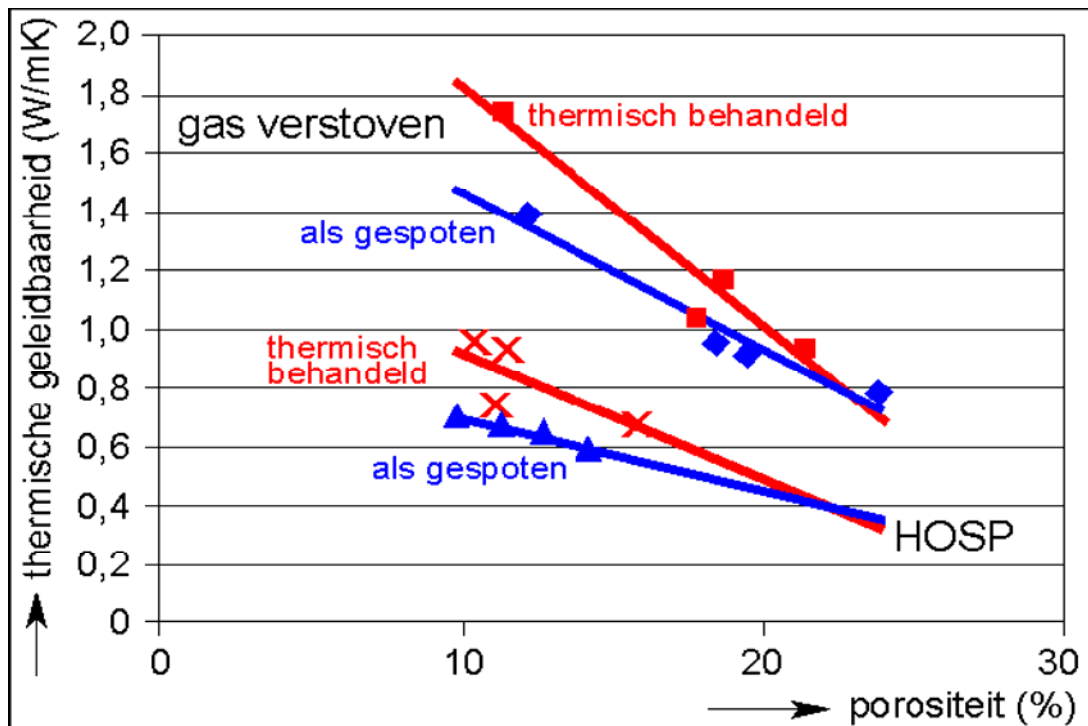
Door het toepassen van de deklaag kunnen thermisch of elektrisch geleidende eigenschappen aan een oppervlak worden gegeven.

3.3.1 Thermische isolatie

Het bekendste voorbeeld is de toepassing van Thermal Barrier Coatings, TBC's, op turbineschoepen van vliegtuigmotoren. Doel van de toepassing is het verhogen van de bedrijfstemperatuur en het beschermen van de substraten tegen deze hoge temperatuur in relatie tot thermische veroudering en vermindering van de mechanische eigenschappen. Enkele materialen die geschikt zijn als TBC zijn:

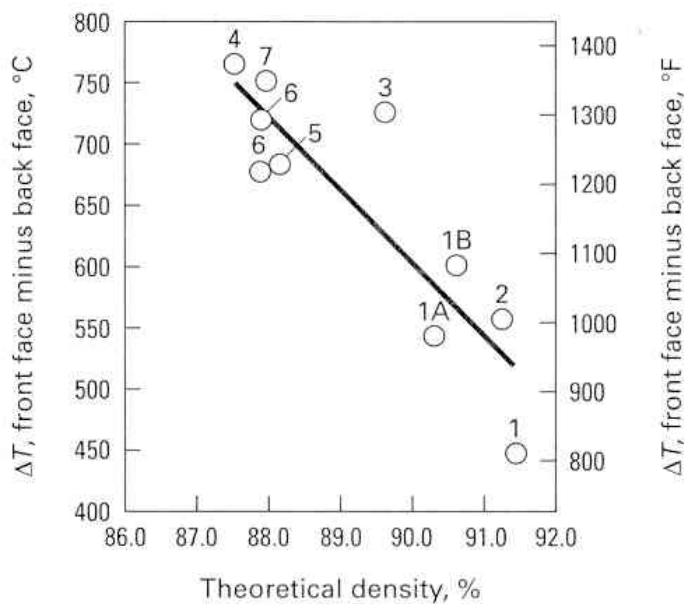
- Yttriumoxide gestabiliseerd zirconiumoxide ($\text{ZrO}_2\text{-8\%Y}_2\text{O}_3$), YSZ. Dit materiaal wordt het meest toegepast en kan onder andere met atmosferisch plasma spuiten, APS, vacuüm plasma spuiten, VPS, physical vapor deposition, PVD, technieken worden aanbracht.
- Scandium oxide (Sc_2O_3) gestabiliseerd zirconiumoxide SYSZ.
- Cerium-oxide gestabiliseerd zirconium-oxide ($\text{CeO}_2\text{-ZrO}$)
- Cerium-oxide + yttriumoxide gestabiliseerd zirconiumoxide ($\text{CeO}_2\text{-YSZ}$)

YSZ wordt tot op heden het meest toegepast in verband met zijn goede thermische eigenschappen. Deze zijn afhankelijk van de laagdikte en de dichtheid/porositeit. Deze afhankelijkheid staat grafisch weergegeven in Figuur 3.4 en Figuur 3.5. Het blijkt dat een lage dichtheid dan wel hoge porositeit gunstig is voor de thermische isolatie.



NOOT: HOSP = Hollow Spherical Powder, een poreus poeder.

Figuur 3.3 Indicatie voor de thermische geleidbaarheid van YSZ afhankelijk van de dichtheid



Figuur 3.4 Temperatuurval van 1,1-1,3 mm dikke ZrO_2 deklagen op een 3,2 mm dikke plaat IN718 (een nikkelbasis legering), afhankelijk van de dichtheid van de deklaag. Piektemperatuur: 1400°C De nummers verwijzen naar verschillende deklagen (ASM Handbook vol 5, 1992)

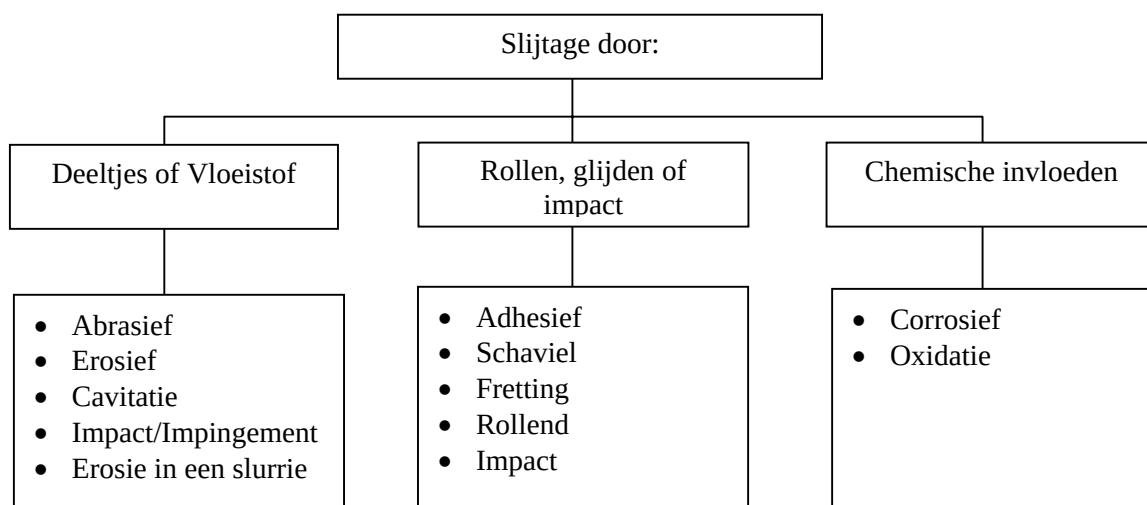
3.3.2 Elektrische isolatie/geleiding

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. Echter, de meerwaarde ligt in de toepassing van een relatief dure deklaag met een lage 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 Voorbeeld 5.

Elektrische isolatie kan verkregen worden met de meeste keramische materialen. Aluminiumoxide is een goed voorbeeld hiervan. Deze lagen worden onder andere aangebracht met thermisch spuiten, APS en HVOF. 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 zirconiumoxide geldt bijvoorbeeld dat deze boven een temperatuur van 950°C elektrisch geleidend wordt.

3.4 Slijtvastheid

Slijtvastheid is een algemeen begrip dat veel mechanismen omvat, en waarbij slijtage geen materiaal- of deklaageigenschap maar een systeemeigenschap is. 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 3.6. VM108 geeft een nadere beschrijving van de verschillende slijtagemechanismen.



Figuur 3.5 Indeling naar slijtagemechanisme

Afhankelijk van het slijtagemechanisme, beïnvloeden de verschillende systeemp parameters die in het systeem een rol spelen de weerstand tegen slijtage of te wel het slijtagegedrag, zie Figuur 3.7. In relatie tot de slijtvastheid wordt vaak de hardheid als sturende materiaalparameter gebruikt. Echter, de hardheid is niet bij alle slijtagemechanismen de bepalende factor en bij geen van de slijtagemechanismen de enige. Figuur 3.7 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.

Tabel 3.3 *Overzicht van slijtage mechanismen en materiaal-, oppervlakte- en milieuparameters die een rol spelen*

	Materiaal parameter									Oppervlak				Milieu												
	Hardheid (basismateriaal vs deeltjes)	E-modulus	Rekgrens	Kerftaaiheid	Koudversteving	Restspanningen	Smeltemperatuur	Microstructuur	Oxidehuid (als corrosiebescherming)	Chemische samenstelling	Wrijvingsweerstand	Ruwheid	Materiaalcombinaties	Type abrasief	Temperatuur	Snelheid	Hoek van inslag	Belasting	Belasting amplitude	Frequentie	Vochtigheid	Corrosieve invloeden	Zuurstof partieldruk Vacuüm	Smering		
Slijtage mechanisme																										
Abrasief				m.n. bij keramiek						afh van mat cominatie																
Erosief																										
Cavitatie																										
Impact/ Impingement																										
Erosie in een slurrie																										
Adhesief																										
Schaviel																										
Fretting																										
Rollend																										
NOTEN: Een grijs vlak betekent dat de betreffende parameter invloed heeft op het betreffende slijtagemechanisme Voor een nadere beschrijving van de slijtagemechanismen wordt onder andere verwezen naar VM108																										

Abrasie en erosie

Deklagen met een hoge hardheid hebben over het algemeen een hoge weerstand tegen abrasie en erosie. Daarom komen in principe PVD en CVD opgebrachte harde lagen, opgelaste, laser gecladde en thermische gespoten harde lagen in aanmerking voor het voorkomen van abrasie en erosie. De gewenste laagdikte bepaalt mede de keuze voor de deklaagtechniek. Omdat met CVD/PCD over het algemeen dunne deklagen worden aangebracht (zie publicatie dunne deklagen op gereedschappen) zal deze techniek afhankelijk van de toepassing onvoldoende dikke deklagen op kunnen leveren.

Bij abrasieve slijtage is de hardheid van de deklaag een belangrijke parameter. Er is een direct verband tussen de weerstand tegen abrasieve slijtage en de hardheid. Materialen die koudverstevigen geven onder belasting, blijken een betere weerstand tegen abrasieve slijtage te hebben.

Voor keramische materialen is gebleken dat ook de kerftaaiheid (K_{IC}) een belangrijke parameter is. Bij een gelijke hardheid blijkt dat bij zirconia (zirkonium-oxide) de weerstand tegen abrasieve slijtage toeneemt met hogere kerftaaiheid.

Cavitatie

Deklagen, aangebracht met lasercladden, oplossen en thermisch spuiten zijn in ontwikkeling in het verhogen van de weerstand tegen cavitatie.

Impact/impingement

Slijtage als gevolg van impact is gedefinieerd als een slijtage proces waarbij een massief lichaam herhaaldelijk op een oppervlak botst.

Impingement is hier een variant op, en is gedefinieerd als een slijtage mechanisme waarbij in een continu proces botsingen optreden tussen een massief oppervlak en vloeistof of massieve deeltjes. Daarbij zijn de inslaande deeltjes significant kleiner dan het oppervlak waarop zij inslaan.

Fretting

Fretting kan optreden als twee oppervlakken, bedoeld of onbedoeld, ten opzichte van elkaar een relatieve beweging uitvoeren. De twee oppervlakken glijden dan over elkaar, waarbij er in principe twee mogelijkheden zijn:

- 1) Belasting gestuurd: waarbij gedeeltelijke slip optreedt. Door de wrijvingscoëfficiënt en/of de normale belasting te verhogen kan dit worden voorkomen of verminderd
- 2) Verplaatsing gestuurd: Hierbij treedt slip op over het gehele contactoppervlak. De bewegingsamplitude is constant en fretting kan worden verminderd of voorkomen door de normale belasting en/of de wrijvingscoëfficiënt te verlagen

De beste methode om fretting te voorkomen is er in de ontwerpfase voor zorg te dragen dat oppervlakken niet ten opzichte van elkaar KUNNEN bewegen.

Bij de keuze van materialen kunnen het best materialen gekozen worden waarvan de basiselementen een lage oplosbaarheid in elkaar hebben. Hiermee wordt bedoeld dat onderdelen die gemaakt zijn van materialen die makkelijk een legering met elkaar vormen, bijvoorbeeld Chroom en IJzer, gevoelig zijn voor fretting. Ook onderling gelijksoortige materialen kunnen dus gevoelig zijn voor fretting.

Indien fretting niet kan worden voorkomen, kan een ruw oppervlak worden gekozen. Ruwe oppervlakken zijn minder gevoelig voor fretting. Een ruw oppervlak kan verkregen worden door het oppervlak na te behandelen met shot peening of gritten. Bij andere slijtagemechanismen kan een hoge ruwheid weer negatief uitwerken. Hiermee moet rekening gehouden worden. Een ander aspect om rekening mee te houden zijn de effecten van restspanningen in het oppervlak in relatie tot de vermoeiingseigenschappen.

De toepassing van deklagen kan fretting voorkomen. In Figuur 2.1 is al een overzicht van deklagen gegeven. In principe komen zowel diffusie lagen als deklagen in aanmerking. Als deklagetechnieken worden bijvoorbeeld elektrodepositie, thermisch spuiten, PCD en CVD technieken toegepast. De keuze van de deklaagtechniek en type deklaag wordt dan afgestemd op het fretting mechanisme. Bijvoorbeeld een deklaag van een materiaal met een lage oplosbaarheid in een materiaal van het tegenlichaam.

Schavielslijtage

Schavielslijtage kan gezien worden als een gecombineerde vorm tussen adhesieve slijtage en fretting. Het verschil is dat bij schavielslijtage de amplitude in vergelijking met fretting zeer klein is. Ten opzichte van adhesieve slijtage zijn de belastingen relatief laag.

Alle slijtagemechanismen kunnen in combinatie met een vorm van corrosieve aantasting plaatsvinden. In alle gevallen geldt daarbij dat de slijtagesnelheid zal toenemen. Hoe en in welke mate is sterk afhankelijk van het systeem.

3.5 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:

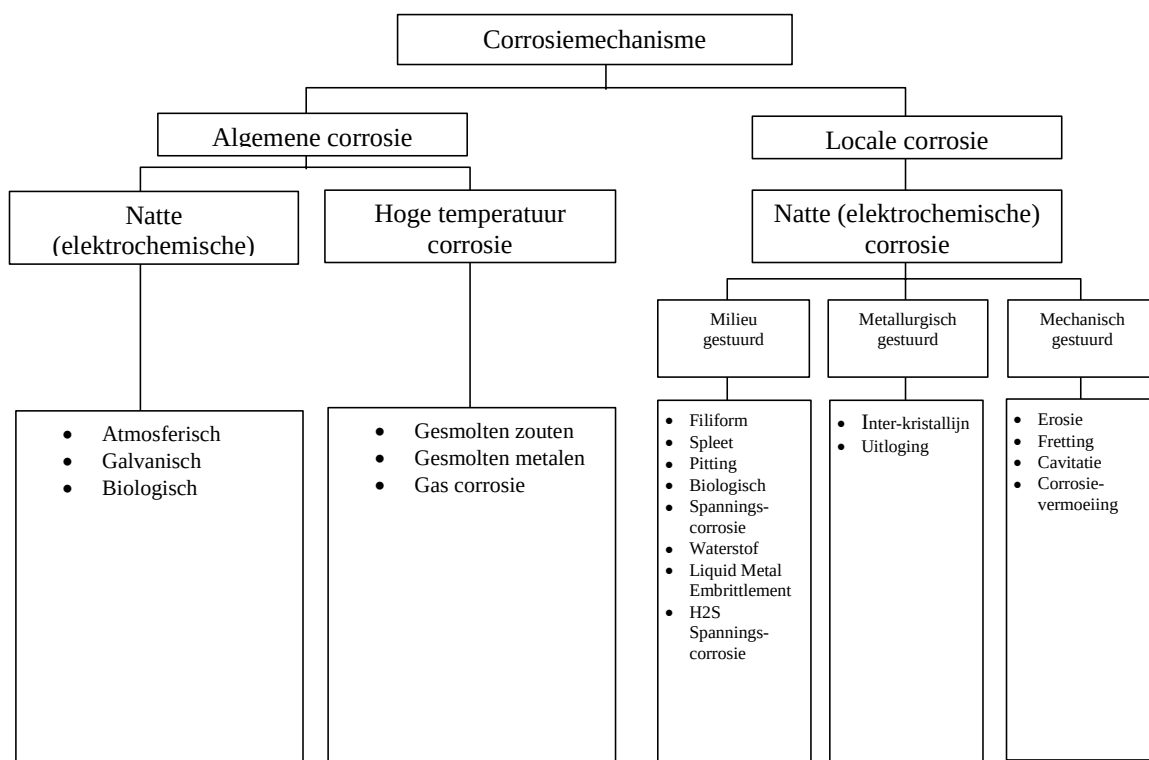
- 1) Algemene corrosie, hierbij wordt het materiaal over het hele oppervlak min of meer gelijkmatig aangetast.
- 2) Lokale corrosie, hierbij treedt corrosie lokaal op, doorgaans als gevolg van constructieve oorzaken (spleten, kieren, materiaalcombinaties) of afwijkende milieucondities (overgang van temperatuur),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

Verder moet onderscheid gemaakt worden tussen natte (electrochemische) corrosie en gascorrosie (doorgaans bij veel hogere temperaturen). De corrosieprocessen zijn voor deze twee toepassingen totaal verschillend. Figuur 3.8 geeft een indeling van corrosiemechanismen. De verschillende corrosiemechanismen ontlede hun naam doorgaans aan hun verschijningsvorm (pitting, algemene corrosie), constructieve oorzaken (spleten, restspanningen), milieu (chloride spanningscorrosie, gas corrosie, atmosferisch). In Figuur 3.9 is een overzicht gegeven van een aantal corrosiemechanismen en welke materiaaleigenschappen, milieu en procesparameters en ontwerpaspecten deze corrosiemechanismen beïnvloeden. Dit overzicht zal niet compleet zijn, echter zij geeft een indruk welke complexe relaties tussen deze parameters bestaan.

Omdat corrosie typisch een functionaliteit is die van het oppervlak wordt gevraagd, zijn deklagen zeer geschikt toegepast te worden 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.

In het kader van deze publicatie voert het te ver op al deze corrosiemechanismen in te gaan. Om de lezer een indruk te geven van de aspecten die bij de selectie van een deklaag een rol spelen wordt daarom op slechts een aantal corrosiemechanismen in de natte (elektrochemische) en hoog temperatuur (gas) corrosie nader ingegaan. Voor meer achtergrond informatie over corrosiemechanismen wordt verwezen naar algemeen toegankelijke literatuur, waaronder VM108, zie Referenties. Op de website www.corrosion-doctors.org is veel informatie over corrosiemechanismen te vinden.



Figuur 3.6 Indeling van corrosiemechanismen

Tabel 3.4 Overzicht van corrosiemechanismen en materiaal, milieu, proces en ontwerpaspecten

		parameter																	
		Materiaaleigenschappen								Milieu/ gebruikscondities			Ontwerpaspecten						
Corrosiemechanismen		Chemische samenstelling								Microstructuur	Hardheid	Elektrolyt	Chemie milieu (Cl, S, O2 ed)	Temperatuur	(rest)Spanningen	Materiaal combinatie(s)	Ruwheid	Speten	Verzamelpunten van vocht
		algemeen	Cr	Al	Si	Mo	Ni	Co	Ti										
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		+			+	+												
	H2S-Spanningscorrosie																		
	Interkristallijn		+			+													
	Putvormige corrosie		+			+													
	Spleetcorrosie		+			+													
	Uitloging																		
	Erosie																		
	Fretting																		
	Cavitatie																		
	Corrosievermoeiing																		
Een grijs vlak betekent dat de betreffende parameter invloed heeft op het desbetreffende corrosiemechanisme																			

3.5.1 Natte (elektrochemische) corrosie

Voor het optreden van natte (elektrochemische) corrosie moet voldaan worden aan een aantal voorwaarden:

- Het materiaal moet in combinatie met het milieu gevoelig zijn voor aantasting.
- Er moet een elektrochemische reactie op kunnen treden; hiervoor moet een voldoende hoog potentiaalverschil en een elektrisch geleidend medium (elektrolyt) aanwezig zijn.

Het onderscheid in algemene en lokale corrosie is vooral bij de natte (elektrochemische) corrosie te maken.

Corrosie kan dus worden voorkomen door:

- Het materiaal of de materiaalcombinatie juist te kiezen. Dit wordt primair gestuurd door de chemische samenstelling.
- Het milieu aan te passen. Bijvoorbeeld:
 - Inhibitoren toevoegen of de procestemperatuur aanpassen.
 - De elektrolyt te verwijderen. In een droge omgeving zal geen elektrochemische corrosie optreden.
- Bedrijfscondities te optimaliseren. Vermijden van bijvoorbeeld (rest)spanningen.

Corrosiebescherming berust in feite op het wegnemen of aanpassen van een van deze drie aspecten.

Corrosievoorbeeld van de effecten binnen een systeem, Spanningscorrosie en spleetcorrosie:

De parameters van het milieu, restspanningen in de constructie en de aanwezigheid van een elektrolyt kunnen door het ontwerp worden beïnvloed. In installaties en bij gesloten systeem komt het milieu onder andere voort uit de procesparameters. Ook ontwerpdetails als restspanningen of bedrijfsspanningen in de constructie, spleten, ruwe oppervlakken, locaties waar vloeistoffen zich kunnen verzamelen hebben grote invloed op het corrosiegedrag van het materiaal in het milieu waaraan het wordt blootgesteld. Het optreden van chloride-spanningscorrosie is een bekend voorbeeld. Op zich kan de concentratie aan chloriden in het milieu zo laag zijn dat geen spanningscorrosie op kan treden. Echter in spleten of verzamel punten van vloeistof (bijvoorbeeld condensaat) kan de concentratie aan chloride zeer hoog oplopen als gevolg van indikking. Corrosiemechanismen als spanningscorrosie en spleetcorrosie krijgen dan een kans. Als in de constructie echter (te) hoge mechanische

Als het milieu onvoldoende kan worden aangepast, als het bijvoorbeeld door de toepassing wordt voorgeschreven en als het niet mogelijk is een elektrolyt te vermijden, zal de oplossing vanuit de materiaalkeuze moeten komen. Omdat corrosiebestandheid een functionaliteit is die van het oppervlak wordt gevraagd, kunnen deklagen een oplossing bieden.

Atmosferische corrosie

Zoals de naam al impliceert, treedt atmosferische corrosie op onder condities waarbij een materiaal aan een normale buitenatmosfeer wordt blootgesteld. Met een buiten atmosfeer wordt dan doorgaans een zeemilieu, stedelijk milieu, industrieel, landelijk of tropisch milieu bedoeld. Daarbij gaat het om buiten exposities.

Voorbeelden zijn:

- Het 'roesten' van koolstofstaal. Dit is een gewoon oxidatie proces waarbij ijzer-oxiden worden gevormd.
- Roestvorming op sommige austenitische roestvaste staalsoorten.
- Dof worden van aluminium gevelbeplating.

Het probleem is goed te verhelpen door:

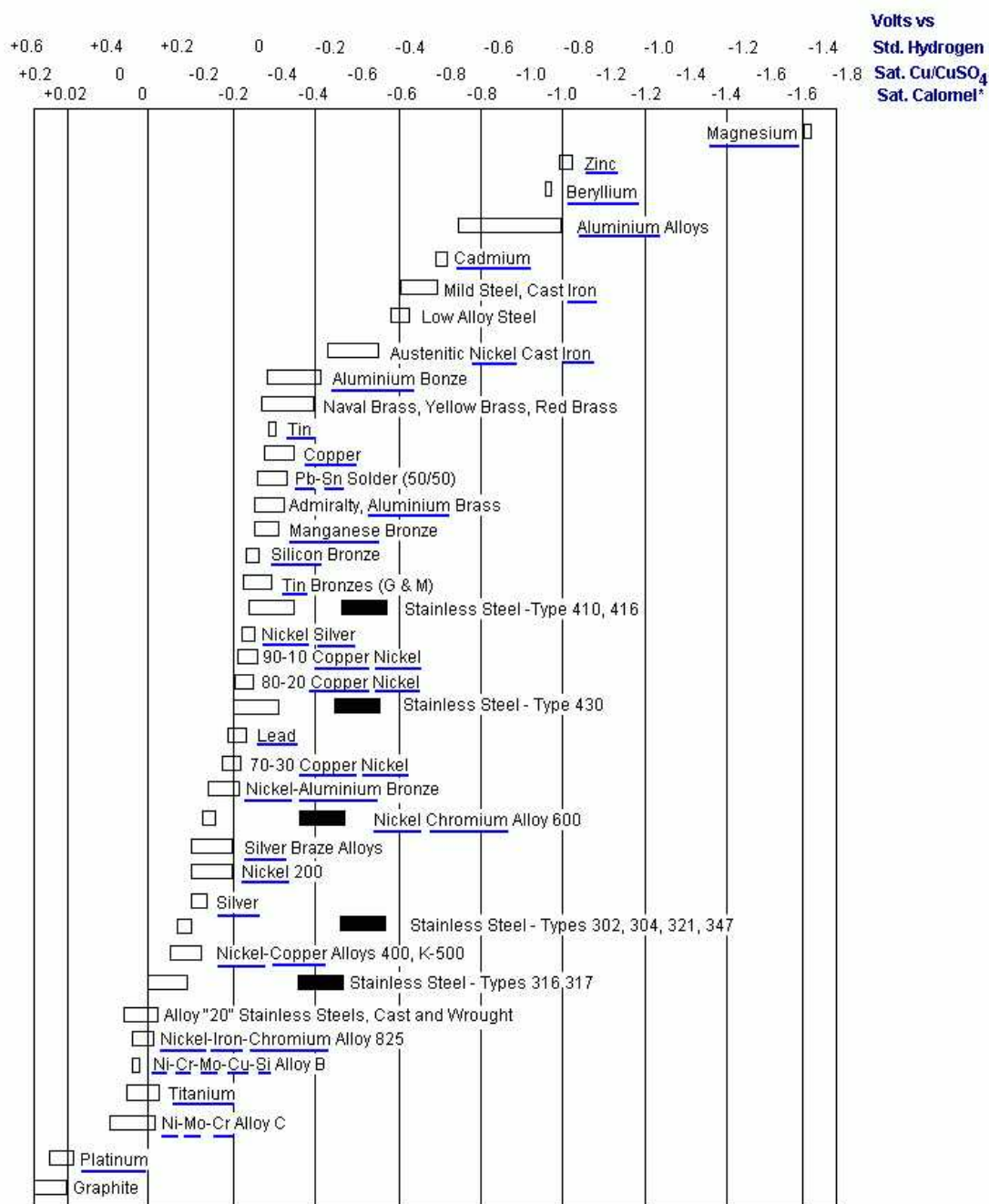
- *Constructieve aanpassingen*: zorg dat het materiaal goed benut kan worden door bijvoorbeeld regen. Vuil spoelt weg en daarmee ook corroderende stoffen zoals chloriden en sulfiden. Een oppervlak met een lager ruwheid helpt daarbij om vuil dan moeilijker vast blijft zitten
- *Keuze van het juist materiaal*. Voor roestvast staal dient bijvoorbeeld voor zeemilieus en industriële milieus het materiaal voldoende molybdeen (2-4% Mo) te bevatten, het chroomgehalte boven de 18% te liggen en een hoger nikkelgehalte (bijvoorbeeld ca 9-10%) werkt mee. Vanaf 2,5% verhoogt magnesium de corrosieweerstand van aluminiumlegeringen in zeemilieus. Dit is het geval voor aluminiumlegeringen in de 5000 serie.

Deze laatste optie biedt toepassingsmogelijkheden voor deklagen. Voordeel is dat voor de sterkte een optimaal basismateriaal gekozen kan worden, dat voor de corrosiebescherming van een deklaag kan worden voorzien.

Als gekozen wordt voor een beschermende deklaag die actief blijft, kathodische bescherming, dan hoeft de deklaag niet porievrij te zijn. De levensduur is dan gerelateerd aan de laagdikte. Bij de keuze van kathodische bescherming moet de deklaag onedeler zijn dan het basismateriaal. De galvanische reeks van metalen in zeewater is een hulp bij de keuze van het deklaagmateriaal, zie Figuur 3.10. Als een deklaag edeler is dan het basismateriaal, zal bij een beschadiging van de deklaag het basismateriaal versneld corroderen, omdat deze de deklaag kathodisch gaat beschermen.

Voor een goede kathodische bescherming is het oppervlak aan deklaag ten opzichte van geëxposeerd basismateriaal (niet bedekt) groot. De stroomdichtheid is dan laag en daarmee de corrosiesnelheid. Dit geeft direct een verklaring voor de hoge corrosiesnelheid van een basismateriaal indien deze onedeler is dan de deklaag en een klein geëxposeerd oppervlak. De stroomdichtheid is dan hoog en de corrosiesnelheid ook.

De keuze van een goede deklaag voor kathodische bescherming aan de hand van de galvanische reeks is slechts een hulpmiddel. Afhankelijk van het milieu kan een deklaag in het ene milieu onedeler zijn en in het andere milieu edeler. Een voorbeeld is het gedrag van zink. In zee- of zoetwater van meer dan 70°C is zink edeler dan staal, waardoor staal zich onder die condities dus zal opofferen ten gunste van het zink.



Figuur 3.7 Galvanische reeks voor metalen in zeewater. Dichte vlakken betreffen actief gedrag van het betreffende materiaal onder condities van een slechte beluchting (laag zuurstofgehalte) (ASM Handbook, vol 13 1992)

Als gekozen wordt voor een passieve bescherming, barrière, moet de deklaag volledig afsluiten en het hele geëxposeerde oppervlak bedekken. Beschadigingen van de deklaag tot op het basismateriaal kunnen leiden tot een versnelde aantasting van het basismateriaal. Een gevaar hierbij is dat de corrosie niet direct zichtbaar is en zich aan inspectie onttrekt.

Selectieve corrosie, put en spleetcorrosie

Putcorrosie ontstaat als gevolg van een locale beschadiging of aantasting van de beschermende oxidehuid. Voor deze lokale beschadiging zijn de drie belangrijkste oorzaken:

- Een mechanische beschadiging van de oxidehuid. Indien het milieu zodanig is dat repassivatie (het herstel van de oxidehuid langs natuurlijk weg door oxidatie) niet optreedt, kan putvormige corrosie optreden. Het gevaar daarbij is dat er een klein actief gebied ontstaat (kathodisch) en een groot passief gebied (anodisch) dat nog bedekt is met een oxidehuid of andere beschermende coating. Er zal daardoor een hoge stroom gaan lopen waardoor de putvormige corrosie verder versnelt.
- Agressief milieu: In specifieke milieu condities kan de oxidehuid lokaal, op wat zwakkere plekken of onder neerslagen worden aangetast. Bekende verontreinigingen zijn daarbij de halogenen, chloor en fluor. Een lokale verzwakking van de oxidehuid kan een gevolg zijn van preferente uitscheiding van bijvoorbeeld chroomhoudende verbindingen in het geval van roestvaststaal. Lokaal is dan onvoldoende chroom aanwezig voor de vorming van een dichte chroomoxidehuid.
- Lokale edele fasen/deeltjes: de omgeving van de aanwezige edele fasen zal deze kathodisch gaan beschermen.

Voor het vaststellen van de weerstand tegen putvormige corrosie is de zogenaamde Pitting Resistance Equivalent (PRE of PREN) ontwikkeld. In de PREN is tevens de invloed van stikstof meegenomen. Hoe hoger de PRE of PREN hoe hoger de weerstand tegen putvormige corrosie. De formules voor de berekening van de PRE en PREN zijn:

$$PRE = \%Cr + 3,3\%Mo$$

$$PREN = \%Cr + 3,3\%Mo + 16\%N + 1,15\%W$$

Spleetcorrosie heeft vaak een constructieve oorzaak. De corrosie treedt op in spleten of kieren waar een medium zich kan verzamelen. Ook deposities kunnen als spleetvormer optreden. Als gevolg van indikking zal dan in de spleten een hogere concentratie aan corrosieve elementen als bijvoorbeeld chloor, zwavel, fluor ontstaan gecombineerd met een slechte beluchting, oftewel een laag zuurstofgehalte. De hoge concentratie aan corrosieve elementen tast de oxidehuid aan terwijl als gevolg van de lage zuurstofconcentratie re-passivatie niet mogelijk is.

Als spleten of kieren niet voorkomen kunnen worden moet een juiste materiaalkeuze gedaan worden.

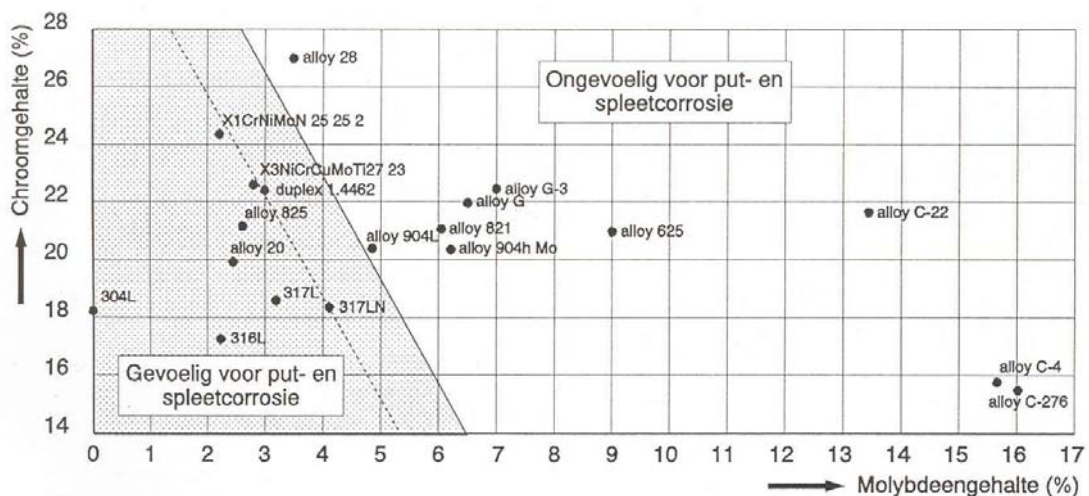
Een belangrijke oplossingsstrategie is de keuze van de juiste legering. Een voldoende hoog chroomgehalte (20% of hoger) en voldoende molybdeen (3% of hoger) zal de weerstand tegen putvormige en spleetcorrosie verbeteren, zie Figuur 3.11. Indien gekozen wordt voor een deklaag, zal een deklaag die aan deze voorwaarden voldoet goed presteren. Ook inerte deklagen, bijvoorbeeld van chroomoxide, zijn hier toe te passen. Nadeel van dit soort deklagen is doorgaans dat deze hard en bros zijn, waarbij de lagen onder een impact belasting en indien aangebracht op een zacht basismateriaal zouden kunnen gaan scheuren (eierschaal effect).

Chloride-spanningscorrosie

Chloride spanningscorrosie is vooral bekend van austenitische roestvast staalsoorten. Deze corrosievorm treedt op bij een combinatie van:

- Voldoend hoge trekspanningen.
- Voldoend hoge concentratie aan chloride.
- Bedrijfstemperaturen boven 50°C. Hoewel in uitzonderingsgevallen bij extreem hoge chloride concentraties en hoge trekspanningen, ook bij lagere temperaturen spanningscorrosie is waargenomen.
- Een materiaal dat gevoelig is voor spanningscorrosie. In dit geval is een hoog nikkelgehalte gunstig. Materialen met meer dan 25% nikkel zijn over algemeen ongevoelig voor chloride spanningscorrosie.

Chloridespanningscorrosie kan voorkomen worden door een van de genoemde parameters weg te nemen of voldoende te verlagen.



Figuur 3.8 Relatieve weerstand tegen putvormige aantastingen spleetcorrosie in relatie tot het Chroom en Molybdeengehalte (Buter, J.E. et al, 1997)

Galvanische corrosie

Galvanische corrosie kan optreden als twee of meer materialen met een voldoende groot potentiaalverschil elektrochemisch met elkaar verbonden zijn. Er moet aan een aantal voorwaarden worden voldaan:

- Er moet een *potentiaalverschil* in het betreffende medium tussen de twee metalen zijn. Voor zeewater en algemene toepassingen kan een indicatie voor het potentiaalverschil worden afgeleid uit de galvanische reeks, Figuur 3.10. Meer naar rechts in deze figuur worden de materialen onedeler.
- De metalen moeten *elektrisch aan elkaar gekoppeld* zijn. Dit kan door een direct metaal-metaal contact maar ook via een elektrolyt.
- Er moet een *elektrisch geleidend medium* zijn (de elektrolyt). Meestal kan dit vertaald worden naar een vochtige/natte omgeving.
- *Ongunstige verhouding tussen anodische en kathodische oppervlakken*. De corrosiesnelheid wordt bepaald door de stroomdichtheid. Hoe hoger het potentiaalverschil en hoe kleiner het onedele oppervlak, hoe hoger de stroomdichtheid en daarmee de corrosiesnelheid. In het geval dat het onedele oppervlak zeer groot is ten opzichte van het edele oppervlak, kan de corrosiesnelheid zo laag worden dat er praktisch gezien geen corrosie optreedt.

Galvanische corrosie kan dus worden voorkomen door één of meer van deze voorwaarden weg te nemen. Bij het aanbrengen van een deklaag als corrosiebescherming moet een belangrijk gevaar niet vergeten worden. Voorziet men het onedele metaal van een deklaag en is in deze deklaag een defect aanwezig, dan zal de verhouding tussen de onedele en edele oppervlakken zeer ongunstig zijn en zal het onedele metaal zeer snel kunnen corroderen. Beter is het dan, als het niet anders kan, het edele metaal te isoleren met een deklaag. Een beschadiging in deze deklaag zal resulteren in slechts een klein edel oppervlak en daarmee een lage stroomdichtheid en corrosiesnelheid.

3.5.2 Hoge temperatuur (gas)corrosie

Bij hoge temperatuur (gas) corrosie treedt de corrosieve reactie direct op tussen het gas en het metaal. Hoge temperatuur (gas) corrosie is een vorm van algemene corrosie. Over het algemeen wordt daarbij gedacht aan oxydische corrosieproducten. Echter, ook zwavel (sulfiden) en koolstof (carbiden) en combinaties van deze corrosieproducten kunnen gevormd worden.

Op het materiaal worden corrosieproducten afgezet. Deze kunnen een schaal op het materiaal vormen. Als deze schaal dicht is, is de diffusiesnelheid door de schaal de bepalende factor. Voor een goed hechtende, dichte schaal zal de corrosie bij een dikte van paar honderd nanometer nagenoeg tot stilstand komen. De vereiste eigenschappen van een beschermende schaal van corrosieproducten zijn:

- Thermodynamisch stabiel, hoe hoger de stabiliteit hoe beter. De schaal wordt dan snel gevormd, ook al bij lage partieldrukken van de vormende gassen. Dit beschermt beter onder reducerende condities. Vooroxideren van het materiaal kan dan noodzakelijk zijn.
- Lage dampdruk, de schaal is dan stabiel en zal bij lage partieldrukken niet verdampen.
- Indien de schaal poreus is of niet gelijkmatig wordt gevormd is het belangrijk dat de verhouding tussen het volume van de gevormde corrosieproducten en het gecorrodeerde materiaal hoog is. Dit wordt de Pilling-Bedworth verhouding genoemd. Het gecorrodeerde materiaal wordt dan snel met een laag bedekt en relatief goed beschermt.
- Lage diffusiecoëfficiënt voor de reactanten (gas-anionen en metaalcationen), zodat de laag langzaam groeit.
- Hoge smelttemperatuur.
- Goede hechting aan het gecorrodeerde basismateriaal. Deze wordt verkregen door een uitzettingscoëfficiënt vergelijkbaar met het basismateriaal, voldoende taaiheid bij hoge temperatuur of een dunne schaal aan corrosieproducten.

De chemische samenstelling van een materiaal of deklaag bepaalt of het materiaal bestand is tegen oxiderende, reducerende, sulfiderende of opkolende condities. Daarnaast moet voor een goede corrosiebestendigheid de deklaag massief (gasdicht) zijn en een goede hechting op het basismateriaal hebben.

Oxiderende en reducerende condities

Voor oxiderende condities zijn de elementen chroom (Cr), aluminium (Al) en silicium (Si) de belangrijkste legeringselementen. Een chroomgehalte van ongeveer 20% wordt wel gezien als de laagste concentratie in metaallegeringen. Toevoegingen van aluminium en silicium verhogen de stabiliteit van de oxidehuid en de dichtheid. Tevens wordt de diffusiesnelheid in de oxidehuid verlaagd.

Voor reducerende condities kan over het algemeen gesteld worden dat het materiaal hogere concentratie aan oxidevormende elementen moet bevatten, met name aluminium en silicium en dat het materiaal voorgeoxideerd moet worden op een hogere temperatuur dan de gebruikstemperatuur.

Bij de selectie van een deklaag die bestand moet zijn tegen hoge temperatuuroxidatie moet dus gelet worden op de oxidehuidvormende elementen. De deklaag moet dicht zijn, om diffusie van de gasvormige fasen naar het basismateriaal te verhinderen en zo onder-corrosie te voorkomen. Onder-corrosie kan er toe leiden dat de deklaag van het basismateriaal wordt afgedrukt.

Sulfiderende condities

Als gevolg van opzwalven, ook wel sulfidatie genoemd, worden legeringselementen zoals chroom en molybdeen die het materiaal zijn corrosievastheid geven, gebonden als sulfiden en zijn niet meer beschikbaar voor corrosiebescherming. Indien een stabiele oxidehuid aanwezig is het gevaar voor opzwavelen gering. Echter, als de oxidehuid beschadigd raakt en de partieel druk van zwavel is hoog, kunnen preferent chroomsulfiden en aluminiumsulfiden gevormd worden. De als sulfide afgebonden chroom en aluminium zijn niet meer beschikbaar voor de vorming van een oxidehuid, zodat na een gegeven tijd de zwavel minder stabiele en meer poreuze verbinding met de andere elementen uit het basismateriaal gaat vormen. Dit veroorzaakt de soms snelle degradatie van het materiaal, waarbij de diffusie het snelst via de korrelgrenzen verloopt.

Opkoling

Dit kan vooral optreden onder reducerende condities, dus bij een lage zuurstof partieldruk, en onder het aanbod van koolstof, bijvoorbeeld in de vorm van methaan of koolmonoxide. Deze lage zuurstof partieldrukken kunnen ook onder deposities optreden. De beste bescherming tegen opkoling is voor-oxideren van het basismateriaal.

Over het algemeen zijn austenitische staalsoorten gevoeliger voor opkoling dan ferritische staalsoorten. Dit wordt veroorzaakt door de relatief hoge oplosbaarheid van koolstof in austenitische staalsoorten. Nikkel schijnt een element te zijn dat een zekere katalytische werking heeft bij opkoling. Een chroomgehalte van minimaal 20 gewichtsprocent (gew%) in ferritische staalsoorten lijkt nodig te voor voldoende weerstand tegen opkoling. Elementen die de weerstand tegen opkoling verhogen zijn: silicium, niobium, wolfram, titaan en zeldzame aarden.

3.6 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.

4. Gebruikscondities waaronder de deklaag moet functioneren

Onder gebruikscondities worden verstaan de condities waaronder een deklaag wordt toegepast. In het systeem waarin de deklaag moet functioneren, spelen de gebruikscondities een zeer belangrijke rol bij de selectie van deklagen en deklaagapplicatietechnieken.

Gebruikscondities kunnen gerelateerd worden aan een aantal aspecten, zie Tabel 4.1. Het kader geeft voorbeelden van aandachtspunten bij de selectie van een deklaag in relatie tot de gebruikscondities.

Tabel 4.1 *Indeling gebruikscondities*

<i>Milieu</i>	<i>Industrie</i>	<i>Operationele condities</i>
Zeecondities (chloriden e.d.)	(Gas)turbines-luchtvaart	Temperatuur
Tropisch	(Gas)turbines-land	Temperatuurwisselingen
Waterig	Stoomturbines	Impact belasting (cavitatie, inslaande deeltjes)
Gas	Automobiël	Vermoeiing/trillingen
Hoge temperatuur	Voedingsmiddelen	Wisselende condities
Lage temperatuur (bv cryogeen)	Proces	Statische en/of dynamische belasting
Zuur	Petrochemie	Slijtage
Basisch	Papier	
	Medisch	
	Nucleair	
	Architectuur	
	Gals	
	Offshore	
	Scheepsbouw	
	Gereedschapmakerij-productiegebonden	
	Gereedschapmakerij-Niet-productiegebonden	
	Elektronica	
	Olie	
	Defensie	
	Metaal	
	Agrarisch	

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 beschouwd worden. 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 een 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 van boven de 70°C om, daardoor gaat het staal het zink kathodisch beschermen in plaats van andersom.

Zirconium-oxide deklagen, aangebracht als elektrische isolator, worden elektrisch geleidend boven de 950°C.

5. 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 5.1 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 6, Keuze van een deklaagtechniek, wordt per techniek indien van toepassing nader op deze aspecten ingegaan.

Tabel 5.1 *Ontwerpaspecten bij de keuze van een deklaag.*

<i>Geometrische aspecten</i>	<i>Productie aspecten</i>	<i>Toepassing gerelateerde aspecten</i>	<i>Onderhoud</i>	<i>Einde levensduur</i>
• afrondingen/overgangen • moet de deklaag inwendig worden aangebracht • moet de deklaag na aanbrengen nog vervormbaar zijn • nabewerken • voorbewerkingen • toegankelijkheid	• effecten op constructieve sterkten • elastisch toelaatbare rekken • effecten op geometrie en maatnauwkeurigheid • thermisch belasting tijdens het aanbrengen van de deklaag • opmenging met het basismateriaal • vormvastheid • lange termijn eigenschappen (treed er bijvoorbeeld diffusie op tijdens gebruik bij hoge temperaturen) • assemblage. Beperkt de deklaag verbindings-technieken • mogelijke laagdikten tegen nodige laagdikten	• restspanningen • statische bedrijfsbelasting • dynamische bedrijfsbelasting • wisselende belastingen • verbindingen • compatibiliteit met andere materialen: kan de deklaag bijvoorbeeld wel op het beoogde basismateriaal worden aangebracht? Treedt er galvanische corrosie op? • stromenende vloeistoffen • max bedrijfs-temperaturen • hechting van de deklaag	• reinigen • reparatie • is de deklaag op locatie aan te brengen	• recycling • afval • ...

6. Keuze van een deklaagtechniek

6.1 Introductie

Aan de hand van Figuur 1.1 en voorgaande Hoofdstukken 3, 4 en 5 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 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 reeds bestaande naslagwerken, zie Referenties. Tabel 6.1 geeft een overzicht van de in deze publicatie behandelde deklaagtechnieken. Daarbij kan een grove indeling naar smeltprocessen en depositietechnieken gemaakt worden. Waarbij het onderscheidt hierin ligt dat bij smeltprocessen (ook) het basismateriaal wordt omgesmolten en bij depositietechnieken niet.

Tabel 6.1 *Overzicht behandelde deklaagtechnieken*

Smeltprocessen			Depositieprocessen	
Oplassen (zie 6.2)	Laser cladden (zie 6.3)	Thermisch spuiten (zie 6.4)	Explosief cladden (zie 6.5)	Dompelprocessen (zie 6.6, 6.7 en 6.8)
• Autogeenlassen • Bmbe (Booglassen met beklede elektrode) • MIG/MAG (Metal Inert Gas/Metal Active Gas) • TIG (Tungsten Inert Gas) • OP (Onder Poederdek) • Plasma • Elektroslassen • elektroslassen met band • PPAW (Plasma Powder Arc Welding)	• CO₂-lasers, • Nd:YAG-lasers en • Diode-lasers	• autogeen draad/poeder spuiten • HVOF (High Pressure-High Velocity Oxygen Fuel) • HP-HVOF (High Pressure-High Velocity Oxygen Fuel) • HVOF draad/poeder (High Velocity Air Fuel) • 'Cold spray'-proces • Detonatie spuiten	• Explosief cladden van dikke plaat • Explosief folie cladden	• Elektrolytische processen- - Galvanotechniek • Stroomloze metaalafzetting • Bad processen

De in Tabel 6.1 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 6.2 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 standaard referenties.

Tabel 6.2 Samenvatting van de karakteristieken van deklaagtechnieken in relatie tot de functionele eigenschappen

	deklaagtechniek					
	Smeltprocessen		Depositieprocessen			
Parameter/karakteristiek	Oplassen	Laser cladden	Thermisch spuiten	Explosief cladden	Elektrolyische coaten	Stroomloze processen
Ontwerpaspecten:						
Opmenging	5-60%	5-10%	geen	geen	geen	diffusielaag
Warmteïnbreng	laag-hoog	laag en alleen lokaal (<0,5mm)	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/metall.)	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
Half-fabriekaat	soms	soms	nee	ja (bijna altijd)	nee	nee
Geometrisch:						
Afronding/randen	0,3mm	0,1mm	5mm	niet gespecificeerd	scherpe overgangen vermijden	geen beperking
Dikte basismateriaal	>5mm	>1mm	>0,5	>0,1mm (met ondersteuning)	niet gespecificeerd	niet gespecificeerd
Inwendig	>350mm	>12mm	>60mm	niet gespecificeerd	toegankelijk voor elektroden	geen praktische beperkingen
Laagdiktebereik	1-10mm	0,1-2mm	0,1-2mm	0,1-10mm	0,02-0,15mm	0,02-0,15mm
Materialen:						
Materiaalcombinaties	elektr. geleidend, metallisch	metallisch	nagenoeg alles mogelijk	minimaal 10% plastische vervorming	elektr. geleidend	bestand tegen bad temperatuur
Metallisch						
Cermets						
Keramisch						
Toepassingen:						
Corrosievastheid						
Slijtvastheid						
Reparatie						
Esthetica						
NOOT: Daar waar een range van karakteristieken is aangegeven is deze afhankelijk van het gekozen proces. Zie de aansluitenden hoofdstukken en bijlagen voor meer details.						

6.2 Oplassen

Van de in Tabel 6.1 genoemde oplasprocessen zijn het Elektroslassen met band en het PPAW proces relatief nieuw en 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. Deze publicatie is via de website www.coating-online.nl te downloaden.

6.2.1 Oplaskarakteristieken

Tabel 6.3 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 van FME/CWM.

Tabel 6.3 *Karakteristieken van de verschillende technieken voor het aanbrengen van deklagen*

Proces	code	vermengings- percentage [%]	hoeveel neersmelt [kg/uur]	laagdikte [mm]	breedte v.d rups [mm]	neersmelt rendement [%]	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
elektro slak (band)		7 - 20	5 - 20	3 - 5,5	30 - 180	90 - 95	goed
Laser		5 - 10	0,5 - 3	0,1 - 2	0,1 - 2	85 - 97	erg goed
Plasma lassen	15	5 - 15	0,5 - 4	1 - 3	2 - 5	85 - 95 98 - 100	goed
PPAW		5 - 10	0,5 - 2,5	1 - 3	2 - 5	80	goed

Bron: TNO Industrie en Techniek Eindhoven

6.2.2 Eigenschappen van opgelaste deklagen

In Figuur 3.7 (Paragraaf 3.4 Slijtvastheid) wordt een overzicht gegeven van de slijtage-mechanismen en andere parameters, die een rol spelen. Één van de genoemde aspecten die een rol spelen bij slijtage is de microstructuur van het neergesmolten metaal. CEN TC 121/SC3 is op dit moment bezig met het opstellen van een norm voor het classificeren van lastoevoegmaterialen en poeders voor het oplassen van slijtvaste lagen, waarbij de volgende indeling als basis dient, gebaseerd op de microstructuur van het opgebrachte metaal, Werkdocument N712, Tabel 6.4.

Tabel 6.4 Classificatie lastoevoegmaterialen opgelaste slijtvaste deklagen

Aanduiding van de aangebrachte deklaag (CEN TC 121/SC3)	Type micro structuur	Typische samenstelling
E – H – Fe – FS	grotendeels ferritisch staal met een tweede fase	0,25% C, met 3% Cr
E – H – Fe – M1	laag gelegeerd martensiet staal	0,5% C, 5% Cr, 0,5% Mo
E – H – Fe – M2	gereedsschapstaal met een tweede harding	0,7% C, 3,75% Cr, 6% Mo, 1,8% W, 1,1% V
E – H – Fe – M3	roestvast staal martensiet	0,17% C, 1,3% Mn, 13,6% Cr, 4,2% Ni, 0,6% Mo, 0,6% Nb, 0,2% V
E – H – Fe – M4	maraging staal, martensiet	0,02% C, 17% Ni, 4% Mo, 9% Co, 0,5% V+Ti
E – H – Fe – MA	ongeveer gelijke delen martensiet en austeniet	1% C, 9% Cr, 3% Si
E – H – Fe – MK	martensiet met gelegeerde carbiden	legeringen 2,5% C, 7% Cr, 1,5% Mo, 5% Ti
E – H – Fe – MEK	martensiet met een eutectoïde van austeniet carbiden	2,2% C, 7% Cr
E – H – Fe – A	austenitisch roestvaststaal met weinig of geen ferriet	Type 307, 309 Mo
E – H – Fe – AF	austenitisch roestvaststaal met meer dan 30 FN (FN = Ferriet Nummer en is een maat voor de hoeveelheid ferriet in het materiaal)	Type 312 (29% Cr, 9% Nb)
E – H – Fe – AM	austenitisch mangaanstaal met weinig of geen chroom	1% C, 14% Mn
E – H – Fe – AMC	austenitisch mangaanstaal met een chroompercentage bijna gelijk aan het percentage mangaan	0,4% C, 15% Mn, 15% Cr
E – H – Fe – AK	austenitisch mangaanstaal met gelegeerde carbiden	2% C, 15% Mn, 3,5% Cr, 3,5% Ti
E – H – Fe – PAE	primaire austeniet met een eutectoïde van austeniet-carbiden en ijzer	2,5% C, 30% Cr
E – H – Fe – NE	bijna een eutectoïde van austeniet – carbiden en ijzer	3,5% C, 25% Cr
E – H – Fe – PKE	primaire chroomcarbiden met een eutectoïde van austenietcarbiden	4,5% C, 25% Cr
E – H – Fe – KKA	primaire chroomcarbiden met gelegeerde carbiden en een eutectoïde van austeniet carbiden	5,5% C, 20% Cr, 6% Mo, 6% Nb

Toelichting:

E: staat voor elektrode, maar kan worden vervangen door T van een gevulde draad, S van een massieve draad of staaf en P voor poeder.

H: geeft het type oplasmateriaal aan,

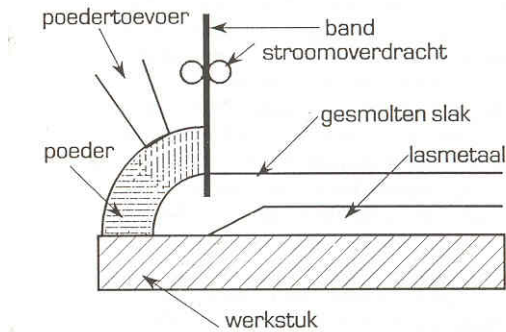
Fe: de legeringsbasis (kan ook Ni, Cu, Co of W zijn) en de

Laatste groep van letters: het type microstructuur, beschreven in de middelste kolom.

Zo zijn er ook tabellen opgesteld voor toevoegmaterialen op basis van Co, Ni, Cu en W (CEN TC 121/SC3, werkdocument N 712).

6.2.3 Elektroslaglassen met band

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 6.1. Het elektroslaglassen is dus in tegenstelling tot het elektrogas lassen een weerstandsproces. Wat op valt is dat het poeder alleen aan de voorzijde van de band wordt toegevoerd. De slakdikte boven de band bedraagt ongeveer 1-3 mm.



Figuur 6.1 *Principeschema elektroslaglassen met band*

De gemiddelde laagdikte varieert van 3 tot 5,5 mm. Er zijn diverse soorten afmetingen van de band, te weten, in breedte variërend van 30, 60, 120, 150, 180 mm en in dikte van 0,5 tot 0,8 mm. De lasparameters zijn, afhankelijk van de bandbreedte: 600 tot 1800 Ampère, bij 24 Volt en 13 – 35 cm/min voorloopsnelheid.

Vermengingspercentage 7 – 20%. De geagglomerde poeders kunnen legeringselementen toevoegen bij een constante boogspanning van 24 Volt, hetgeen inhoudt dat het toegevoegde legeringselement constant van kwaliteit is in tegenstelling tot bij het OP-draad en band-lassen, waarbij de boogspanning variabel is. De uitsteeklengte heeft geen invloed op de toebrand.

Er zijn twee mogelijkheden om aan de gewenste samenstelling te komen om in één laag te lassen.

- band 10% overlegeren,
- poeder met extra legeringselementen.

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 nikkelbasis. De lasprocedures zijn geschikt voor hoge of lage snelheid (2 soorten). De voortloopsnelheid is de grote variabele. De met stikstof gelegerde lasbanden zijn bestendig tegen een warmtebehandeling.

Toepasbaarheid:

Elektroslaglassen met band is interessant voor werkstukken met een minimum buitendiameter van 220 mm. De minimale inwendige diameter voor werkstuk stukken is 350mm (met een kleine laskop) en de minimale plaatdikte is 30 mm. Een stationaire opstelling is hierbij een voorwaarde.

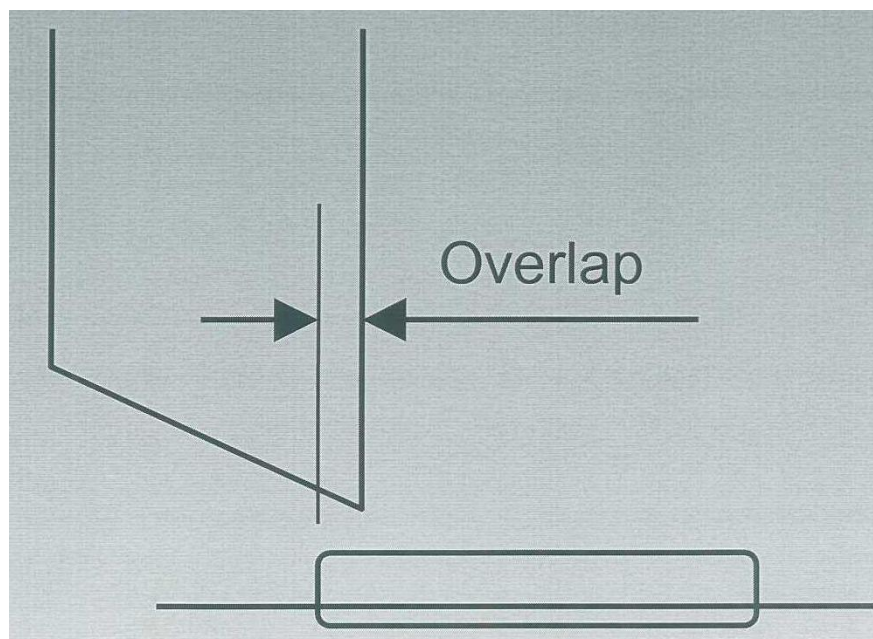
De breedte van de overgangszone waarna de chemische samenstelling van de opgelaste laag niet meer beïnvloed wordt door opmenging met het basismateriaal is 0,2 mm. In principe moet worden uitgegaan van een vlakke situatie in de PA-laspositie (waterpas opstellen!).

Een nadeel is de magnetische blaaswerking tijdens het lassen. Vanaf 60 mm. bandbreedte is magneetbesturing noodzakelijk. (beheersing magnetische velden). De voor- en nadelen van het elektroslaklassen met band zijn samengevat in Tabel 6.5.

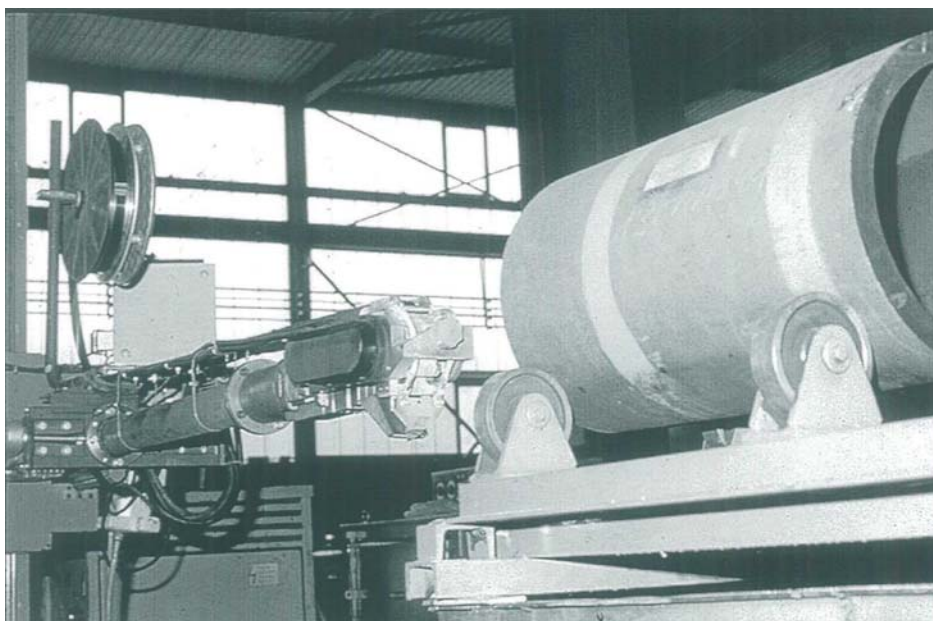
Tabel 6.5 Voor- en nadelen van het elektroslaklassen met band

Voordelen:	Nadelen:
• geringe inbranding en dus lagere opmenging; • laag poederverbruik (0,6 à 0.8 kg/kg band); • mooi lasuiterlijk; • gemakkelijke slaklossing; • hoge neersmeltsnelheid / lassnelheid; • hoge zuiverheidsgraad lasmetaal; • laag zuurstofgehalte van het lasmetaal, wat zich vertaalt in hoge taaiheden.	• minder bekend proces – conservatisme; • beschikbaarheid geschikte lasbron (vermogen – karakteristiek); • beschikbaarheid bandlaskop; • afmetingen/wanddikte werkstuk (warmte-afvoer); • moeilijke beheersbaarheid van het vloeibare smeltbad in de PA-positie. • de magnetische blaaswerking tijdens het lassen. Vanaf 60 mm. bandbreedte is magneetbesturing noodzakelijk, wat de beheersing van het proces moeilijker maakt. (beheersing magnetische velden).

De overlap voor de volgende rups moet 4 – 8 mm bedragen, Figuur 6.2. Figuur 6.3 toont een opstelling voor het elektroslaklassen met band.



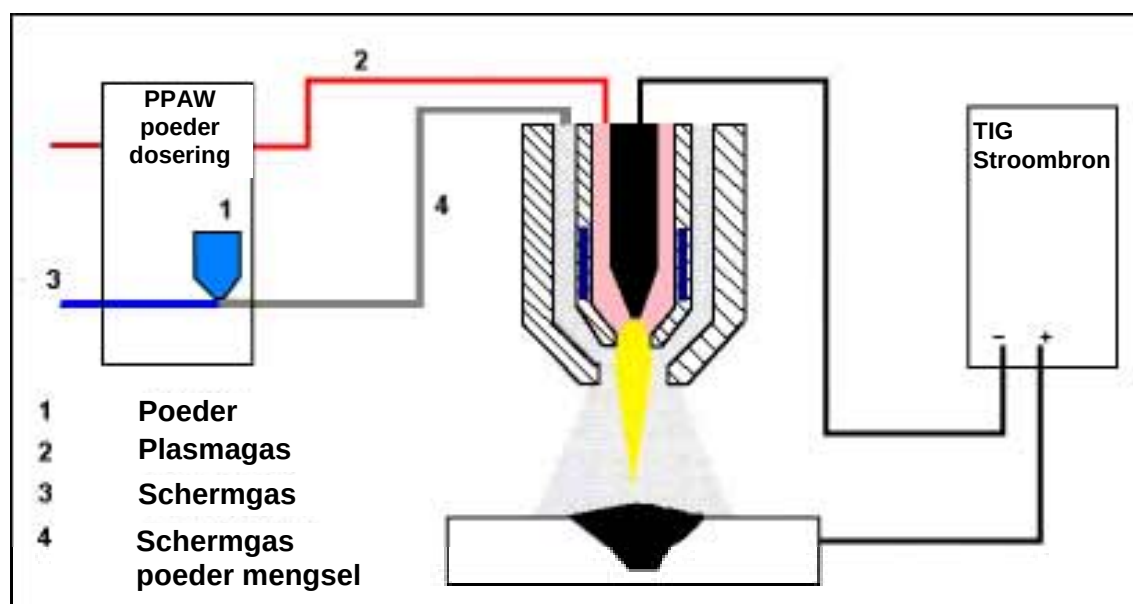
Figuur 6.2 De overlap (4-8 mm) -



Figuur 6.3 Opstelling van het elektroslaklassen met band

6.2.4 PPAW

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 6.4. Er wordt gelast met een normale ingesnoerde plasmaboog die wordt ontstoken door een hulpboog (pilotboog). 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 plasma-lassen.



Figuur 6.4 Principe PPAW

Voor een optimale benutting van het proces is mechanisatie noodzakelijk net als bij het conventionele proces. In dit geval is bijvoorbeeld bij de toepassing van een robot in het conventionele proces (met draad) een extra as (de zgn. 7e as) noodzakelijk om de draad op de juiste plaats in het smeltbad in te voeren als de lasrichting wijzigt. Het Plasma Poeder lassen heeft door de centrale poedertoevoer deze extra as niet nodig. Er kan in alle richtingen worden gelast.

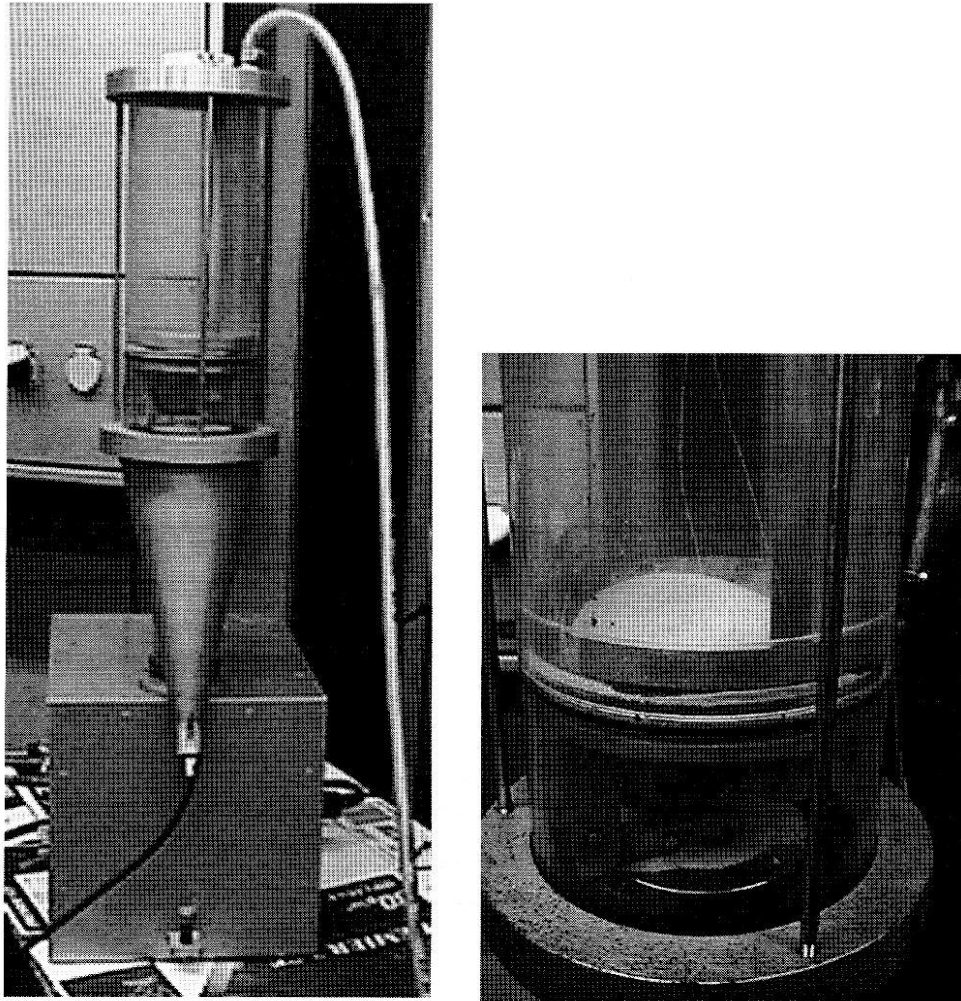
Het te gebruiken poeder moet aan strenge eisen voldoen ten aanzien van vorm en korrelgrootte omdat het soepel met het beschermgas meegevoerd moet kunnen worden. De vereiste korrelgrootte van het poeder bedraagt 80 tot 150 μm . De 40-100 μm fractie, de poedergrootteverdeling die veel bij het thermisch spuiten van metallische materialen wordt gebruikt, is te klein voor het Poeder Plasma oplossen. Wel bestaat de mogelijkheid dit poeder op de juiste fractie uit te zeven.

Een beperking van het gebruik van poeder is dat niet alle metalen in poedervorm verkrijgbaar zijn en dat poeder duurder is dan de lasdraad.

Kenmerken van het PPAW-proces zijn:

- Poederdoseringgas is Argon (en soms Argon + 5% H_2 voor roestvast staal), met een debiet van 3-5 l/min. Het beschermgas voor het plasmalassen is argon (± 16 l/min).
- Het poeder is afgestemd op het te lassen materiaal.
- Poederverbruik 0 tot 50 gram/min.
- Lasparameters 200 ampère voor handmatig lassen, 25-35 volt, voortloopsnelheid 15-50 cm/min.
- Ook als gewone plasma-apparatuur te gebruiken.
- Mooie aangevloeide lassen (bijvoorbeeld fietsframes, stalen meubilair). Oppervlakte moet voor de voedingsmiddelenindustrie worden nabewerkt (relatief ruw oppervlak).
- Toepassingsgebied: kleine oppervlakten vanaf 20 mm^2 tot 400 cm^2 . (de kracht zit in kleine onderdelen). HVOF is efficiënter voor grotere oppervlakten.
- Tweemaal duurder dan een TIG-stroombron ($\pm$ € 15.000,-).
- Lastoorts en slijtonderdelen zijn prijzig.
- De lassnelheid is ca 2 tot 5 maal zo hoog als het TIG-lassen.
- Geringe overdikte las met mogelijkheid tot een diepe inbranding.
- Het aangebrachte lasmetaal bevat weinig insluitsels en is vrij homogeen van samenstelling. In één laag wordt de vereiste samenstelling verkregen.
- Geschikt als reparatieproces bij het elektroslak bandlassen.

De poederdosering vindt plaats door middel van een doseringseenheid, zoals die is weergegeven in Figuur 6.5. Het poeder valt vanuit een buffervat op een ronddraaiende schijf. Een in hoogte verstelbare schraper, in combinatie met een traploze instelling van de rotatiesnelheid van de schijf, zorgt voor een juiste en goed doseerbare hoeveelheid poeder.



Figuur 6.5 *Poederdoseerapparatuur en een detailopname van de ronddraaiende schijf met schraper*

6.2.5 Toepassing voor Poeder Plasma oplassen

- 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 MAG en TIG lassen aan de ene kant en het lasercladden aan de andere kant.

6.3 Lasercladden

Lasercladden is het met een gefocusseerde laserbundel als energiebron aanbrengen van een deklaag met behulp van toevoegmateriaal. Lasercladden wordt daarbij gekenmerkt door een geringe opmenging tussen toevoegmateriaal en basismateriaal waarbij beiden worden omgesmolten. Lasercladden wordt ook laseroplassen genoemd en in het Engels lasercladding of laser overlay welding.

Het toevoegmateriaal kan op twee manieren worden toegevoegd:

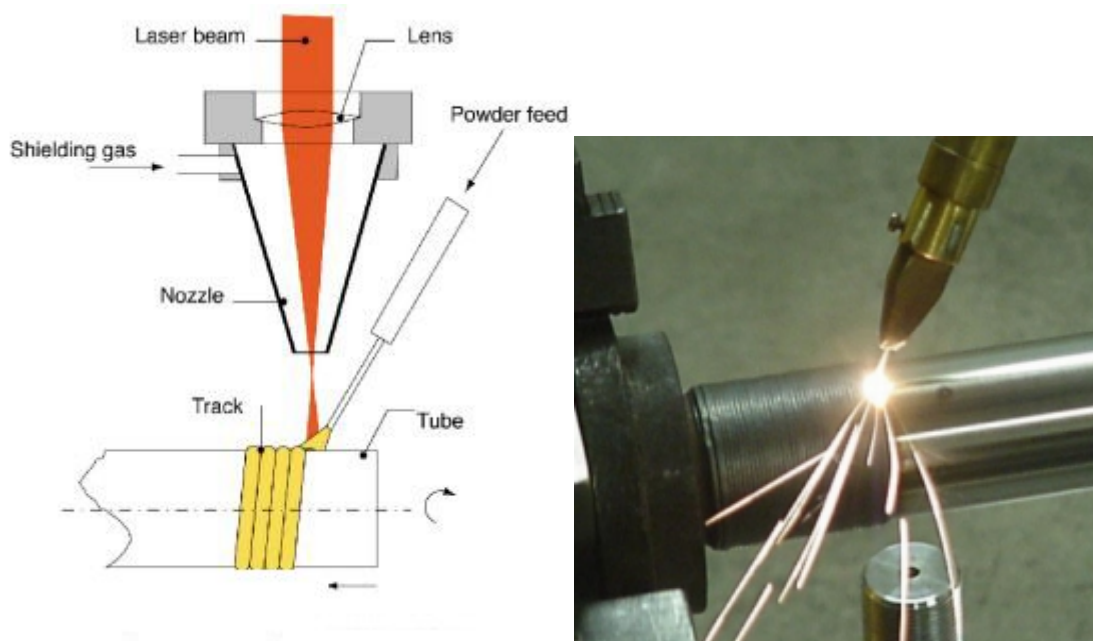
- 1) In de vorm van poeder, draad. Dit is een één-stapsproces en/of. zie Figuur 6.6.
- 2) In de vorm van een vooraf aangebracht materiaal, bijv. een galvanische of thermisch gespoten laag of een prepad van poeder in polymeer. Dit wordt een twee-stapsproces genoemd.

Een gedetailleerd beschrijving van het laserclad proces kan gevonden worden in de FME/CWM publicatie ti-00-11.

Naast lasercladden zijn nog de volgende laserbewerkingen van het oppervlak te 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.

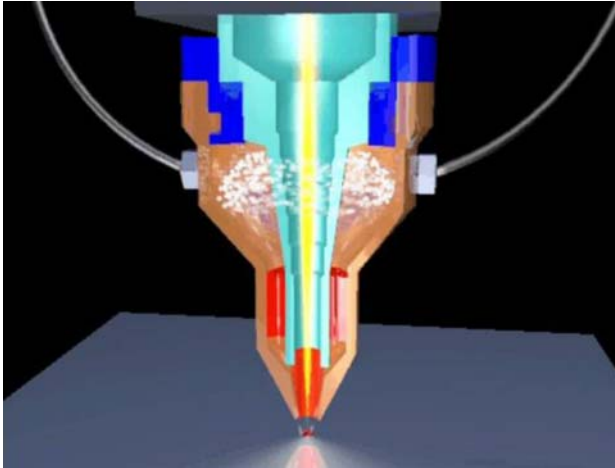


Figuur 6.6 Schematische voorstelling van het lasercladden

6.3.1 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 6.7. 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 6.7 Schematische voorstelling coaxiale nozzle bij lasercladden

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

Alle laserbronnen met voldoende vermogen (typisch van 10^4 tot 10^5 W/cm²) 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 gebruikt worden zijn:

- CO₂-lasers,
- Nd:YAG-lasers en
- diode-lasers

Voor lasercladden worden momenteel meest de Nd-YAG en hoog-vermogen diode-lasers ingezet. In vergelijking met CO₂ lasers hebben diode-lasers hogere 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 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 een 500W Nd:YAG of diode-laser 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. CO₂-laserstralen zijn bijvoorbeeld niet geschikt voor transport door een glasvezel. Vanwege de golflengte vindt veel adsorptie plaats.

6.3.2 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: RVS, (super)duplex, Ni-basislegeringen, Ti-legeringen, CuNi-legeringen
- Slijtvastheid: Cobaltbasislegeringen, snelstaal, Ni-basislegeringen met WC, CuNi
- Warmvastheid: roestvast staal, Ni-basislegeringen, Cobaltbasislegeringen

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

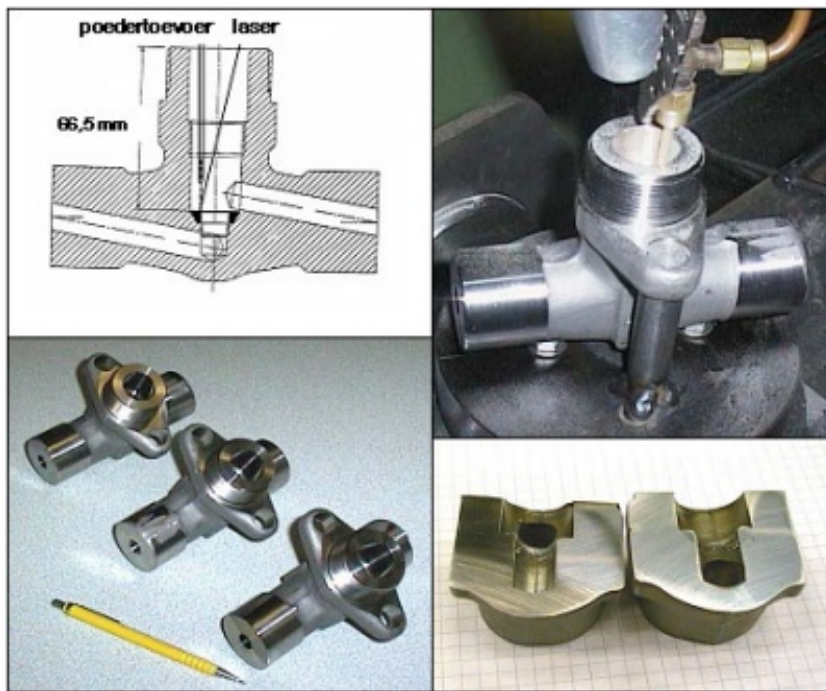
6.3.3 Ontwerpaspecten voor een lasercladlaag

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

- een kleine warmtebeïnvloede zone (veelal $< 0,5$ mm),
- weinig vervorming, en
- de mogelijkheid tot het oplassen van dunwandige produkten en scherpe randen. (Voorbeeld 4 en Figuur 6.8),
- kleine boringen zijn zeer goed toegankelijk zolang een line-of-sight te creëren is (Voorbeeld 3).

Door de relatief grote snelheid bij uitvoering en geringe spotafmetingen (1 – 5 mm) treedt snelle afkoeling op, resulterend in een fijne stolstructuur en voor koolstofhoudende staalsoorten met relatief hoge hardheden. In deze zeer smalle zone in het basismateriaal ($< 0,5$ mm) kunnen afhankelijk van het basismateriaal krimpscheurtjes 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 ($< 10 \mu\text{m}$) aanwezig zijn. Lasercladden vraagt geen of een minimale voorbereiding; en een geringe nabewerking. Het proces wordt met NC-machines uitgevoerd, waardoor 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.



Figuur 6.8 Inwendig lasercladden van een 1/2" plugafsluiter (NedClad)

De aan te brengen laagdikte is afhankelijk van het beschikbare vermogen en de in te stellen parameters. De laagdikten 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 nabewerkt te worden tot de gewenste eindmaat en oppervlakterutheid. Dit betekent dat lasergecladde oppervlakken voor deze bewerkingen toegankelijk moeten zijn.

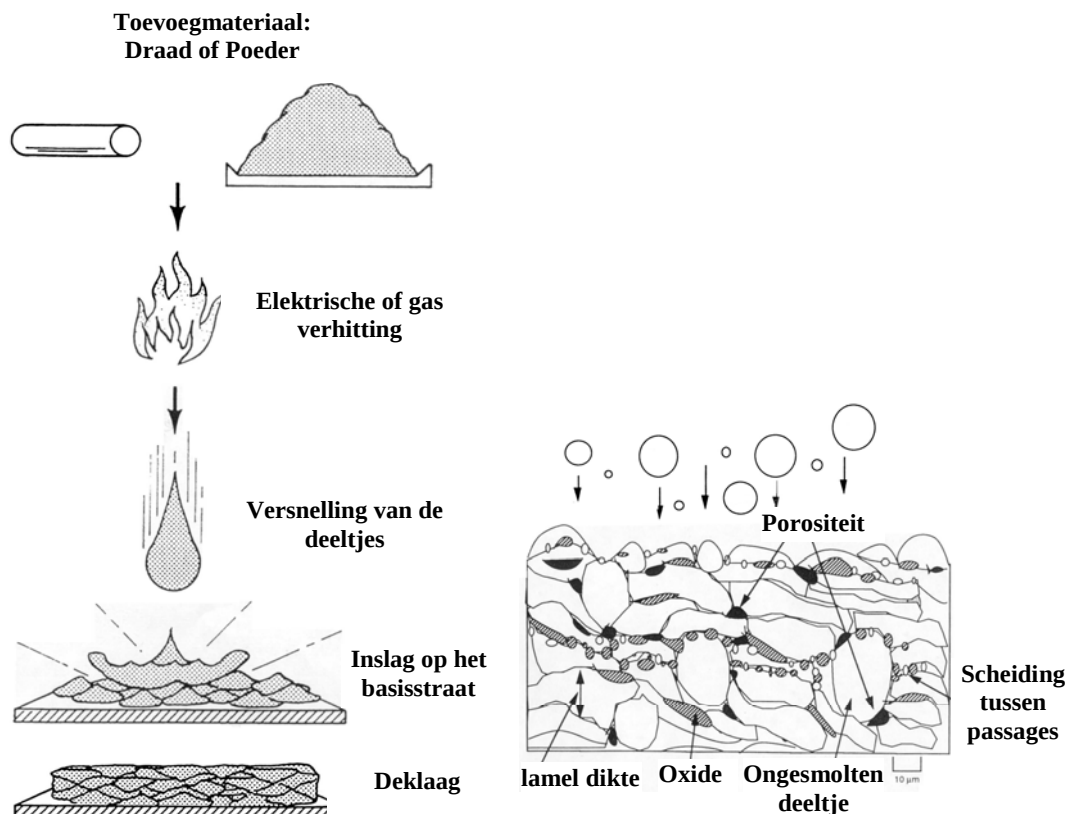
Voorbeeldproducten:

- spuitgietgereedschappen,
- afsluiters,
- nokkenas,
- krukas,
- schroeven, extruders,
- pomponderdelen, impellers,
- stangen, cilinders, zuigers,
- hittebestendige lagen ten behoeve van koleninjectoren, warmtewisselaars.

6.4 Thermisch spuiten

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.

In Figuur 6.9 is een grafische voorstelling van een thermisch spuitproces weergegeven.



Figuur 6.9 Schematische weergaven van het thermisch spuitproces

6.4.1 Korte omschrijving diverse thermische spuitprocessen

Op dit moment is er een breed scala aan thermische spuitprocessen, elk met zijn eigen (deklaag) karakteristieken, beschikbaar, zie Tabel 6.6. De processen zijn in drie hoofdgroepen in te delen, afhankelijk van hoe de thermische en kinetische energie wordt opgewekt, zie Tabel 6.6. Om een goede hechting van de deklaag te krijgen dient de som van thermische energie en kinetische energie voldoende te zijn en zo zal bij het ene systeem minder thermische en meer kinetische energie voorhanden zijn en bij een ander systeem visa versa. Met voldoende energie wordt hier bedoeld dat een deeltje op het moment van impact op het basismateriaal plastisch is zodat het kan vervormen, zie ook Figuur 6.9 en Figuur 6.10.

Hieronder volgt een korte omschrijving van de diverse systemen. Voor een uitgebreide omschrijving, zie VM95 *Thermisch spuiten* en VM108 *Corrosiebestendige en slijtvaste oppervlaktelagen* (2 uitgaven van FME). Tevens worden de belangrijkste kenmerken en voor- en nadelen genoemd.

Tabel 6.6 *Karakteristieken van de verschillende thermisch spuitprocessen*

	Brandstof+zuurstof mengsel					elektrisch + gas		Elektrisch
	<i>autogeen</i>	<i>HVOF</i>	<i>HP-HVOF</i>	<i>detonation gun</i>	<i>cold spray</i>	<i>plasma</i>	<i>vacuüm plasma</i>	<i>elektrisch draad</i>
<i>nominale vlam-temp [°C]</i>	3300	5200	5000	>5200	350-800	18000	16000	4000
<i>Deeltjes temperatuur [°C]</i>	2500	3300	3200	--		>3800		>3800
<i>nominale deeltjessnelheid [m/s]</i>	50-200	200-1000	>1200	800-900	550-1000	200-800	900	50-200
<i>Spuitafstand [mm]</i>	??	150-200	250-350	??	10-50	50-150	30	80
<i>porositeit [%]</i>	10-20	<2	<0,5	0,1-1	<0,1	5-10	<5	10-15
<i>hechtsterktes [MPa]</i>	20-28	>68	40-96	>175	>175	<70	>70	10-40
<i>sputcapaciteit [kg/h]</i>	1-10	2-8	2-8	3-6	6-8	4-8	4-8	8-60
<i>oxide</i>	10-15				<1	20-70	0	10-20
<i>min/inw/dia - lengte [mm]</i>	niet	180 - 610	180-160	niet	niet	60 - 650	60 - 650	100 - 900

Brandstof+zuurstof mengsel:

- autogeen draad/poeder spuiten,
- HVOF (High Velocity Oxygen Fuel),
- HP-HVOF (High Pressure-High Velocity Oxygen Fuel),
- HVAF draad/poeder (High Velocity Air Fuel),
- 'Cold spray'-proces,
- detonatie spuiten.

Bij deze systemen wordt een zuurstof-brandstofmengsel (bijv.: waterstof, acetyleen, kerosine) in een verbrandingskamer tot ontbranding gebracht en via een nozzle naar buiten geleid. Deze systemen (behalve autogeen spuiten) kenmerken zich door hoge deeltjessnelheden waardoor dichte deklagen met zeer lage porositeit (1% of lager), lage oxidatie en goede hechting bewerkstelligd kunnen worden. Tevens zal de warmte-inbreng op het basismateriaal gering zijn.

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

Elektriciteit+gasinjectie:

- plasma: APS (Atmospheric Plasma Spraying),
- VPS (Vacuüm Plasma Spraying),
- hoge snelheid APS.

Bij plasmaspuiten wordt tussen anode en kathode in het pistool een boog getrokken, het plasmagas (argon, waterstof, helium of stikstof) wordt geïoniseerd en verlaat via de nozzle het pistool. Door de zeer hoge vlamtemperatuur zijn keramische materialen makkelijk te spuiten. De porositeit is ten opzicht van bijvoorbeeld (HP-)HVOF hoger en ligt zo rond de 6%.

Elektriciteit

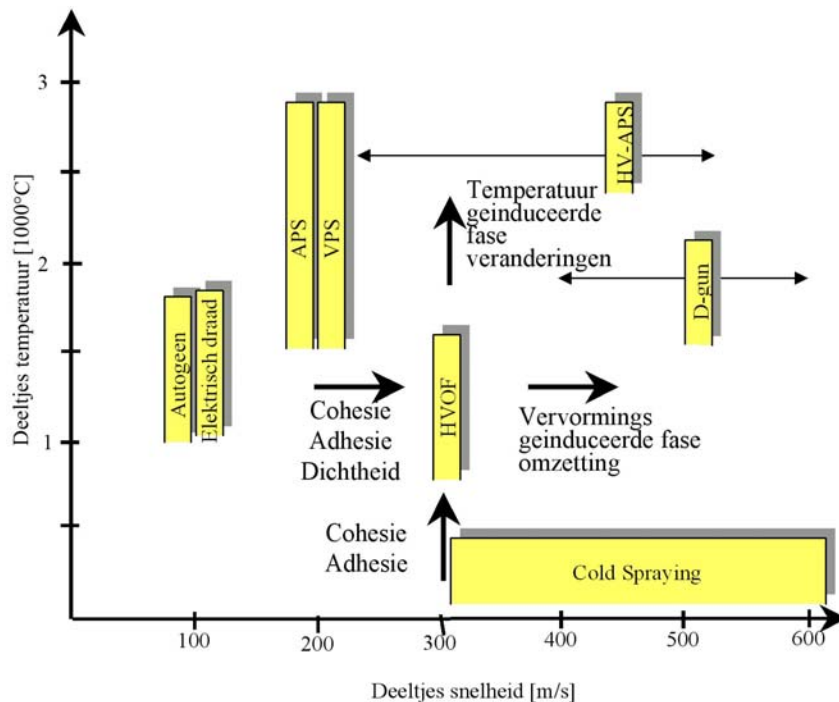
- Elektrisch draadspuiten

Bij het draadspuiten worden twee elektrisch geleidende draden met een eenparige snelheid door een pistool naar elkaar geleid. Tussen deze twee draden staat een spanning waardoor de uiteinden van deze 2 draden smelten en met behulp van perslucht (ook Argon of Stikstof is mogelijk) naar het basismateriaal geblazen waar het een deklaag vormt.

Het proces kenmerkt zich door:

- een relatief sterke oxidatie,
- grote depositie snelheden,
- dikke lagen.

In Figuur 6.10 is een schematisch overzicht gegeven van een aantal spuitsystemen afhankelijk van de thermische en kinetische energie van het verspoten materiaal. In deze figuur staan tevens globaal de effecten op de deklaagkarakteristieken aangegeven.



Figuur 6.10 Overzicht van thermisch spuitprocessen ten opzicht van de thermische en kinetische energie van toevoegmateriaal

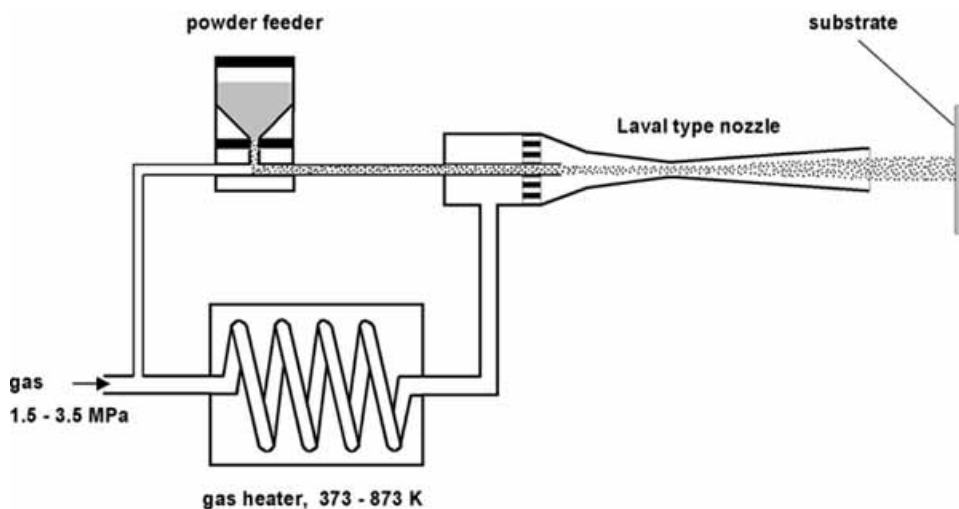
HVOF/HVAF draadspuiten

HVAF (High Velocity Air Fuel) draadspuiten is een techniek die de voordelen van twee 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 corrosie bestendige legeringen en Fe-Cr-B-C gevulde draden.

Cold spray proces

Het proces is schematisch weergegeven in Figuur 6.11. 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. Met het Cold Spray proces kan een breed scala materialen verspoten worden. 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. Het verspuiten van composieten, zoals cermets (carbide-mengsels) of deklagen met een hoge hardheid heeft 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 aan te brengen laagdikten. Volledig keramische materialen zijn niet met het Cold Spray proces te verspuiten.



Figuur 6.11 *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 oxide-vrije 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, etc.

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

Omdat het niet de doelstelling is in deze publicatie in te gaan op de details van de verschillende thermisch spuitprocessen wordt hiervoor verwezen naar bestaande publicaties VM95 en VM108 en andere open literatuur, zie ook <http://www.coating-online.nl/>.

6.4.2 Eigenschappen thermisch spuitproces

Hechting op het substraat

Voordat een object van een deklaag voorzien kan worden dient dit eerst vetvrij gemaakt en opgeruwd te worden om de hechting te verbeteren. Opruwen van het oppervlak gebeurt doorgaans door straalgritten. Naast een ruwer oppervlak wordt het oppervlak tevens gereinigd. Om oxidatie of verontreiniging van het oppervlak na het gritten te voorkomen moet de deklaag binnen 1 uur worden aangebracht. Op een vervuild en/of geoxideerd oppervlak heeft een opgespoten deklaag een lagere hechting. Bij een goede voorbereiding en afhankelijk van het spuitproces zijn hechtsterkten boven 100 MPa haalbaar (HVOF spuitproces).

Afhankelijk van het spuitproces, kan de temperatuur van het basismateriaal tijdens het spuiten ongewenst hoog oplopen, tot honderden graden Celsius. Met name bij dunne substraten (weinig massa) of als een dikke deklaag wordt opgespoten kan het nodig zijn het basismateriaal te koelen. Dit kan met een zogenaamd luchtmes of door het basismateriaal op een koelplaat te klemmen. Bij een goed uitgevoerd thermisch spuitproces zal de temperatuur van het basismateriaal beperkt blijven tot maximaal ca 150-180°C. De materiaaleigenschappen van het basismateriaal worden dus niet thermisch beïnvloed zoals bij bijvoorbeeld oplassen wel het geval is.

Porositeit

Afhankelijk van het systeem zal er een zekere porositeit zijn die, afhankelijk van de toepassing, positief of negatief kan uitwerken op de functionaliteit van de deklaag. Positieve effecten van een poreuze deklaag kunnen gevonden worden in:

- noodloopeigenschappen van layers,
- mogelijkheid tot geringe vervormingen; dit wordt bijvoorbeeld toegepast bij TBC's.

Een negatieve invloed op de functionaliteit kan ontstaan als de deklaag corrosiewerende eigenschappen moet hebben en de deklaag edeler is dan het basismateriaal.

Thermische spuitprocessen met een relatief lage deeltjestemperatuur (lage thermische energie) en een hoge kinetische energie leveren deklagen met een lage porositeit, zie Figuur 6.10. HVOF, Detonation gun (D-gun) en Cold Spray-processen geven deklagen met een porositeit die onder de 0,5% kan liggen.

Insmelten van thermisch gespoten deklagen

Indien porositeit ongewenst is of de hechtsterke van een thermisch gespoten deklaag niet voldoet, kan de deklaag aan een aanvullende thermisch behandeling worden onderworpen, het zogenaamde fuseren of insmelten. Het werkstuk wordt met 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 komen 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 deklagen is een aparte en aanvullende techniek waarmee de eigenschappen van de deklaag naar de geëiste functionaliteit kunnen worden geoptimaliseerd.

Laagdikten

De maximale dikte van de deklaag hangt hoofdzakelijk af van het materiaal en wordt gelimiteerd door de inwendige spanningen. Voor keramische deklagen zal deze rond de 200 µm liggen terwijl voor metallische lagen enkele millimeters geen probleem is. Een deklaag kan eventueel worden nabewerkt:

- Met een mechanische bewerking (bijvoorbeeld draaien, slijpen, polijsten). Voor het herstellen van de nominale maat.
- Met het oog op maatvoering, verlagen ruwheid of om het product esthetisch mooi te maken
- Ten behoeven van insmelten: met een vlam over de deklaag om bijvoorbeeld de hechting te verbeteren (door diffusie), de porositeit te verlagen of de weerstand tegen bijvoorbeeld puntbelasting te verhogen.
- Door sealen (het dichtend van poriën met een dun vloeibare kunststof die na aanbrengen uithard en poriën afdicht): door sealen kan de corrosiebestendigheid verhoogd worden.

Enige vorm van automatisering is wenselijk om homogene, reproduceerbare deklagen met uniforme diktes te kunnen spuiten. Doordat er een groot assortiment aan poeders bestaat kent het thermisch spuiten veel toepassingsgebieden.

6.4.3 Functionele eigenschappen thermisch gespoten deklaag

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

- bescherming tegen corrosie (bijv.: RVS, Al, Zn, Ni-Cr-legeringen),
- bescherming tegen slijtage (bijv.: WC-Co, Cr₂C₃),
 - abrasieve slijtage (harde deeltjes tussen 2 oppervlakken),
 - adhesieve slijtage (2 metaalvlakken glijden over elkaar),
 - vermoeiingsslijtage (terugkerende druk en schuifspanningen),
 - erosieve slijtage (deeltjes in een stroom gas of vloeistof),
- slijtgewillige laag (bijv.: Nikkel-grafiet composiet),
- reparatie van beschadigde onderdelen (materiaal afhankelijk van onderdeel),
- elektrische isolatie (bijvoorbeeld Al₂O₃),
- thermische isolatie (bijvoorbeeld ZrO₂-Y₂O₃, Al₂O₃),
- smering (molybdeen),
- esthetisch (bijvoorbeeld een koperlaag op hout),
- enz.

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

Deklaagkarakteristiek

De functionele deklaageigenschappen worden deels bepaald door de deklaagkarakteristiek. Het spuitsysteem verwarmt en versnelt de poederdeeltjes (al dan niet in gesmolten toestand) richting basismateriaal. Als de poederdeeltjes het basismateriaal bereiken worden deze plastische vervormd en verankeren zich aan het basismateriaal en ontstaat er een pannenkoekachtige (lamel) structuur, zie Figuur 6.9.

De belangrijkste deklaagkarakteristieken (dichtheid, hardheid, hechting, porositeit, chemische resistentie) worden daarbij bepaald door:

- het toegepaste thermisch spuitsysteem,
- de gebruikte procesparameters;
 - spuitafstand, hoeveelheid deklaagmateriaal dat per tijdseenheid wordt opgebracht, deeltjessnelheid, deeltjestemperatuur.
- het toegepaste toevoegmateriaal;
 - chemische samenstelling, deeltjesgrootte verdeling (bij spuitpoeders) en druppelgrootte (bij draad als toevoegmateriaal), schijnbare dichtheid, primaire carbide grootte (bij Cermets).
- de dikte van de deklaag; in dikkere deklagen zijn hogere restspanningen aanwezig die een negatieve invloed op de hechting kunnen hebben,
- de voorbehandeling basismateriaal en nabehandeling van de deklaag.

Om een goede hechting van de deklaag te garanderen dient het basismateriaal goed schoongemaakt en opgeruwd te worden. Het spuitsysteem heeft echter de belangrijkste invloed op de deklaagkarakteristieken zoals, porositeit, oxidatie, hechting, ruwheid en dikte van de deklaag. De hechting hangt af van de voorbewerking en de kinetische energie van de poederdeeltjes (spuitsysteem afhankelijk). Een ruwer oppervlak en een hogere snelheid van de deeltjes verbeteren de hechting van een deklaag.

De porositeit wordt hoofdzakelijk bepaald door het gebruikte systeem en secundair door korrelgrootte en korrelvorm van het te gebruiken poeder. Door een keuze van de systemen en procesparameters kan in de porositeit gestuurd worden. Afhankelijk van de toepassing kan gebruik gemaakt worden van deze porositeit. Zo kunnen poriën gevuld worden met smeerolie, zodat bij een storing noodloop-eigenschappen ontstaan. In het geval van TBC's krijgt een deklaag op deze wijze de mogelijkheid tot het opvangen van de verschillen in thermische uitzettingscoëfficiënt tussen de deklaag en het basismateriaal.

Tijdens het spuiten zal er een zekere oxidatie van de poederdeeltjes plaatsvinden waardoor er insluitsels van oxides zijn. Dit zorgt voor een verharding en vervuiling van de deklaag en is in de meeste gevallen niet gewenst.

De ruwheid van de opgespoten deklagen hangt bij spuitprocessen die poeders verspuiten hoofdzakelijk af van de korrelgrootte van de gebruikte poeders. De ruwheid ligt doorgaans tussen de 2 tot 20 μm . Bij draadspuiten worden bij autogeen en elektrisch draadspuiten verschillende ruwheden bereikt. Elektrisch draadspuiten levert daarbij doorgaans deklagen met een lagere ruwheid op. Lagere ruwheidswaarden zijn mogelijk door nabewerking.

6.4.4 Ontwerpaspecten bij het thermisch spuiten

Er zijn beperkingen met betrekking tot het aanbrengen van deklagen en de grote 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 materiaal 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 thermisch spanningen als gevolg van krimp tijdens het stollen van de deeltjes.

- Dikte deklaag

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

- Hechting op het basismateriaal

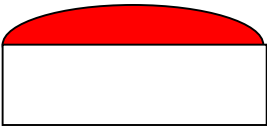
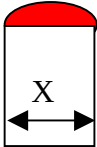
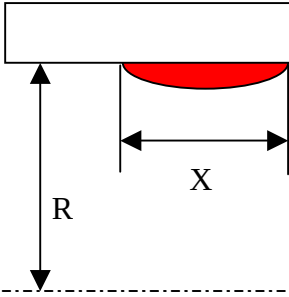
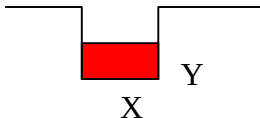
Bij het thermisch spuiten is het belangrijk dat het basismateriaal een goede voorbehandeling krijgt om een goede hechting te garanderen. De sterkte zal uiteraard niet zo hoog zijn als het basismateriaal. In de praktijk blijkt echter dat de hechtsterkte voor de meeste toepassingen voldoende is.

- 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 verdeeld worden.

- Geometrie

Scherpe overgangen, randen en groeven kunnen ervoor zorgen dat de deklaag niet goed hecht en de dikte niet uniform is. Zie Figuur 6.12 voor een overzicht.

<u>Configuratie</u>		<u>Afmetingen (mm)</u>	<u>Beperkingen</u>
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

Figuur 6.12 Thermisch spuiten, richtlijnen aangaande de vorm en geometrie van op te spuiten materialen

- 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 HVOF, HP-HVOF en het 'Cold Spray' proces) onder 1% komt. Afhankelijk van de toepassing kan een hoge porositeit gewenst zijn:

- 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 overbrugd worden.

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

- De combinatie van een harde deklaag en een relatief zacht basismateriaal
Deze dient onder bepaalde omstandigheden vermeden te worden. 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 zogenaamd line-of-sight techniek. Dat betekent dat alleen oppervlakken die niet zijn afgeschermd van een deklaag kunnen worden voorzien. Daarbij worden de beste deklagen 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.

6.4.5 Toepassingsvoorbeelden

Corrosie:

boorplatform, 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.

Smering:

onderdelen van een automotor.

6.5 Explosief cladden

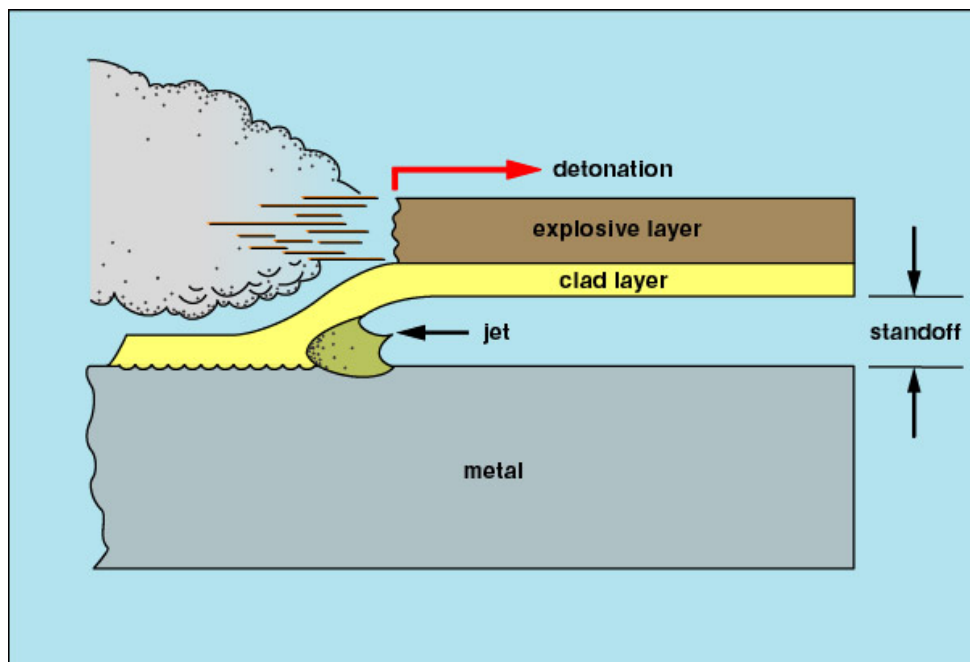
Het explosief clad proces is een bekledingsproces voor metalen dat al meer dan veertig jaar commercieel wordt toegepast door gespecialiseerde bedrijven. Het wordt door deze bedrijven op een grote schaal (vele vierkante meters tegelijk) uitgevoerd. Doordat het een proces betreft dat bij kamertemperatuur plaats vindt, blijven de metalen in hun vaste fase en wordt de microstructuur van het basismateriaal niet beïnvloed. Doordat er geen warmte wordt toegevoerd ontstaat er ook geen warmte-beïnvloede zone (WBZ) of opmenging door diffusie of een smeltfase (geen stollingskrimp). Dit maakt het mogelijk behalve gelijksoortige metalen ook ongelijksoortige metalen te verbinden. Omdat er geen thermische processen optreden kan de vorming van brosse intermetallische verbindingen effectief worden tegengegaan en veelal geheel worden voorkomen.

6.5.1 Het explosief cladproces

Het explosief cladden van metaalplaten wordt uitgevoerd door middel van een parallel opstelling van op elkaar te verbinden platen iets boven elkaar. De spleet (standoff) tussen de platen bepaalt de versnelweg van de bovenste (clad layer), aangezien deze laatste door het detoneren van een erboven geplaatste springstoflaag wordt versneld, zie Figuur 6.13. 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 normalerwijze het noodzakelijke pure metaal-metaal contact voor een metaalbinding. Door het zelfreinigende effect van de jet is het vooraf reinigen van de te verbinden metaal oppervlakken eenvoudig (licht opschuren en ontvetten) en is dit soms zelfs niet nodig.

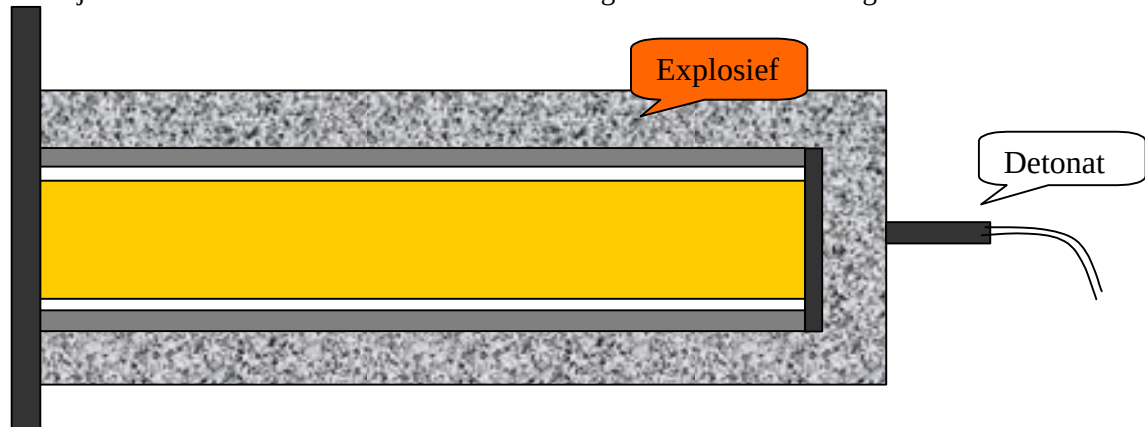
Voor het cladden van een metaalfolie dient een bufferlaag tussen de springstof en de folie te worden gebruikt. Deze bufferlaag beschermt de folie en voorkomt dat deze gaat golven of geperforeerd wordt door de interactie met de gasvormige detonatieproducten die met een zeer hoge snelheid (circa 1000 m/s) over het oppervlak razen. Bij foliecladden is de cladlaag in Figuur 6.13 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.



Figuur 6.13 Schematische voorstelling van het explosief clad-proces. (bron: TNO Defensie en Veiligheid)

Voor het explosief cladden is het niet noodzakelijk dat de te verbinden oppervlakken ook vlak zijn. Alleen een constante afstand tussen de te verbinden plaatdelen is van belang, alhoewel deze afstand wel tot 50% mag variëren. Meestal wordt als richtlijn voor de standoff de dikte van de cladlaag aangehouden (in het geval van foliecladden de dikte van de bufferlaag plus folie). Om te voorkomen dat een te groot oppervlak met een folie moet worden bekleed, is het in voorkomende gevallen beter en efficiënter een dikkere bekleding aan te brengen op een kleiner maar dikkere ondergrond. Deze kan nadien door walsen (of draadtrekken) op de uiteindelijk gewenste dikte en dimensies worden gebracht.

Voor het bekleden van een staaf of buisvorm kan het eenvoudigst van een clad materiaal 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 cladden buis of staf. De springstoflaag wordt tegen de te versnellen buis geplaatst (zie Figuur 6.14), waarbij hetzelfde botsingsproces optreedt als in het geval van vlakke platen (zie Figuur 6.13). Door een buis tijdelijk op te vullen met een medium wordt implosie tijdens het cladden voorkomen en kunnen op dezelfde wijze als stafmaterialen ook buizen zowel inwendig als uitwendig worden bekleed. Na het explosief cladden (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 6.14 Schematische weergave van de opstelling voor het explosief cladden van een metalen staaf (bron: TNO Defensie en Veiligheid)

6.5.2 Explosief cladden met dikke plaat

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 (TI.05.25) (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.

Het explosief cladden kan zowel onder atmosferische condities als onder vacuüm worden uitgevoerd. Daarbij wordt bij explosief cladden onder vacuüm een kwalitatief betere deklaag verkregen in termen van dichtheid, insluitsels, porositeiten, taaheid, procesbeheersing en latere verwerking zoals zagen en snijden.

De voor- en nadelen van explosief cladden staan weergegeven in Tabel 6.7.

Tabel 6.7 Voor en nadelen van explosief cladden

Voordelen	Nadelen/beperkingen
• <i>Optimale microstructuur:</i> 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 een gedefinieerde (geoptimaliseerde) microstructuur. • <i>Hechting:</i> 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-, afschuiving- en trekproeven (bij deklagen > 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 clad-proces veelal toegepast voor de vervaardiging van half-fabrikaten. Hierdoor kunnen eenvoudige vormen (vlakke of enkel gekromde oppervlakken) worden bekleed, waarop nadien nog omvormprocessen en verspanende technieken kunnen worden uitgevoerd.	• <i>Toepassings temperatuur:</i> 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 AlFe₃ fasen. Bij het lassen moet met deze effecten rekening gehouden worden. Met een tussenlaag als diffusiebarrière kunnen deze temperatuurbependingen van gecladde metalen worden opgeheven, zie Figuur 6.16. • <i>Afmetingen:</i> onder atmosferische condities zijn oppervlakken tot 40 m² standaard. Bij het explosief cladden in vacuüm zijn de afmetingen beperkt tot die van de vacuümkamer. Hier zijn afmetingen tot 25m² mogelijk. • <i>Vorm:</i> over het algemeen is de vorm beperkt tot vlakke platen en licht gekromde oppervlakken. Met explosief cladden worden daarom doorgaans alleen half-fabrikaten gemaakt. De uitstekende hechting tussen de lagen maakt nadere bewerkingen zoals plastisch omvormen en lassen goed mogelijk.

Met explosief cladden kan een grote variatie aan materiaalcombinaties aan elkaar worden verbonden, zie Figuur 6.15.

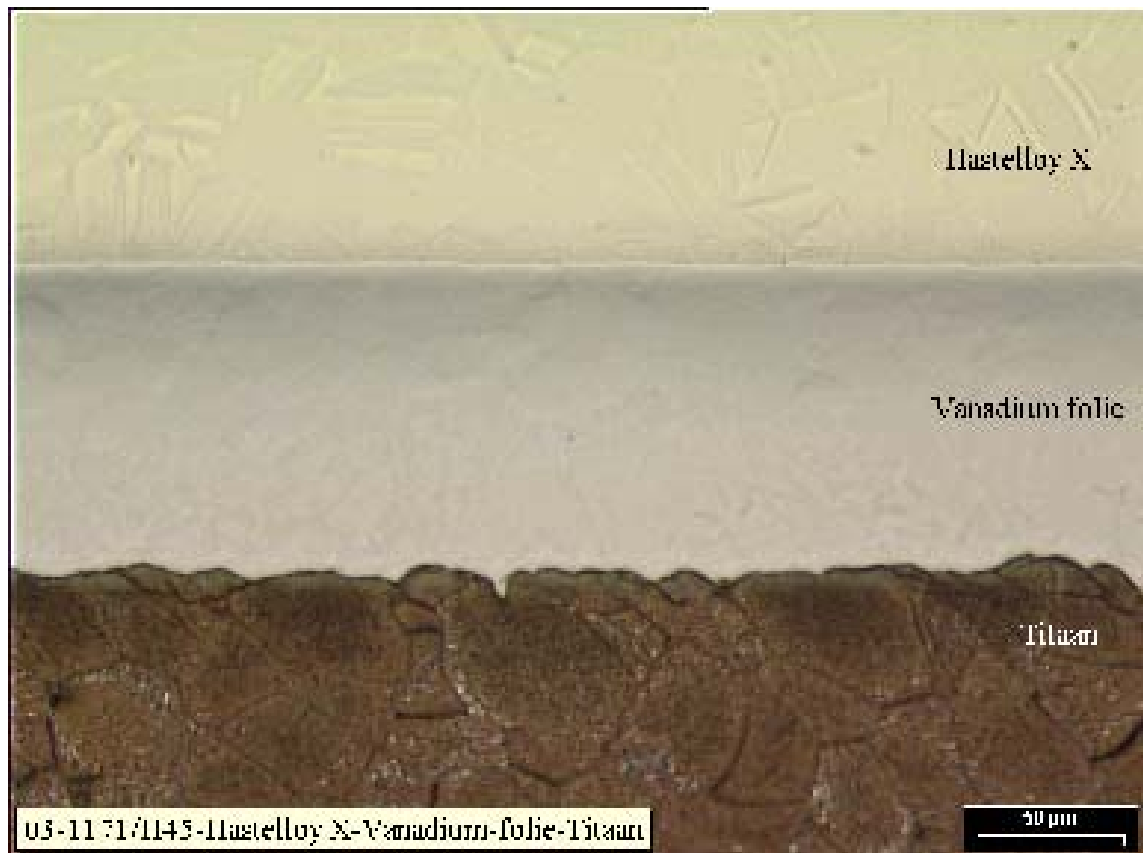
Clad Layer	Stainless Steel Nickel	Duplex Nickel-Alloys	Titanium Aluminium	Zirconium Copper	Tantalum Copper-Alloys	Al-Bronze
Base Material	Carbon Steel	Stainless Steel	Alloyed Steel	Copper	Aluminium	

Figuur 6.15 Voorbeelden van mogelijke materiaalcombinaties met explosief cladden (internetsite smt)

6.5.3 Explosief cladden van metaalfolies

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.



Figuur 6.16 *Bekleding van titanium plaat met een folie van een nikkel-legering (Hastelloy X) met een Vanadium tussenlaag als diffusiebarriere die de vorming van brosse TiNi-fasen tegengaat.*

6.5.4 Ontwerpaspecten bij explosief cladden

Bij het explosief cladden is het van belang ermee rekening te houden:

- dat er een voldoende grote standoff mogelijk is tussen het basismateriaal en de cladlaag,
- deklaagdikten van 0,1 tot 30 mm zijn te realiseren,
- oppervlakken tot 40 m² zijn standaard explosief te cladden,
- als voorbereiding kan meestal volstaan worden met opschuren (verwijderen van de oxidehuid),
- explosief cladden is een handmatig batch proces,
- toe te passen metalen dienen een minimale rek van 10% te hebben,
- zachte (onlegeerde) metalen zijn doorgaans eenvoudiger toe te passen dan de sterkere legeringen,
- of er na het cladden nog een bewerking uitgevoerd moet worden, lassen, snijden, zagen, frezen enz. Dit kan invloed hebben voor de keuze voor explosief cladden onder atmosferische condities of onder vacuüm,
- dat explosief geclad materiaal doorgaans niet geschikt is als eindproduct, maar als halffabrikaat wordt toegepast,
- dat de restspanningen in het explosief gecladde product bij verhoogde temperatuur kunnen relaxeren en een vervorming van het product kunnen veroorzaken. Bij halffabrikaten is dit doorgaans geen probleem,
- dat explosief cladden niet geschikt is als reparatiemethode,
- dat explosief cladden niet op locatie kan worden uitgevoerd (in verband met geluid en explosieven),
- dat bij toepassingen op verhoogde temperatuur, afhankelijk van de materiaalcombinaties, er intermetallische fasen gevormd kunnen worden, bv AlFe₃ bij de combinatie Al aan staal bij temperaturen boven 315°C. Met een tussenlaag als diffusiebarrière kunnen deze temperatuurbeperkingen van gecladde metalen worden opgeheven, zie Figuur 6.16.

6.5.5 Voorbeelden van explosief cladden

Dikke lagen gemaakt met explosief cladden

Er worden dikke deklagen op veelal staalplaat aangebracht ten behoeve van de proces-industrie (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 bimetaal platen worden vervolgens ketelbodems en -wanden vervaardigd die in raffinaderijen en diverse andere onderdelen van de chemische proces-industrie worden gebruikt.

Voor de scheepsbouw worden overgang-strips 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 van St 52 bekleed met een corrosievaste aluminium legering (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 (Nobelclad) en Triplate (SMT) verkocht. Mits rekening gehouden wordt 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 electriciteit 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 (electrolyse). 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

In hoofdstuk 10 staan voorbeelden van explosief cladden nader uitgewerkt. De behandelde voorbeelden zijn:

- cladden van RVS301 staaf met een elektrisch geleidende zilverlegering, Voorbeeld 5,
- wolframfolie op koper in verband de thermische belasting, Voorbeeld 6,
- tantaalbekleding van een koperen buis in relatie tot corrosieweerstand,
- RVS-folie op Titaan 6.4 ter verhoging van de weerstand tegen fretting.

6.6 Elektrochemische of elektrolytische processen

Een bekende aanduiding is Galvanotechniek. Met deze techniek worden langs elektrochemisch weg deklagen 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).

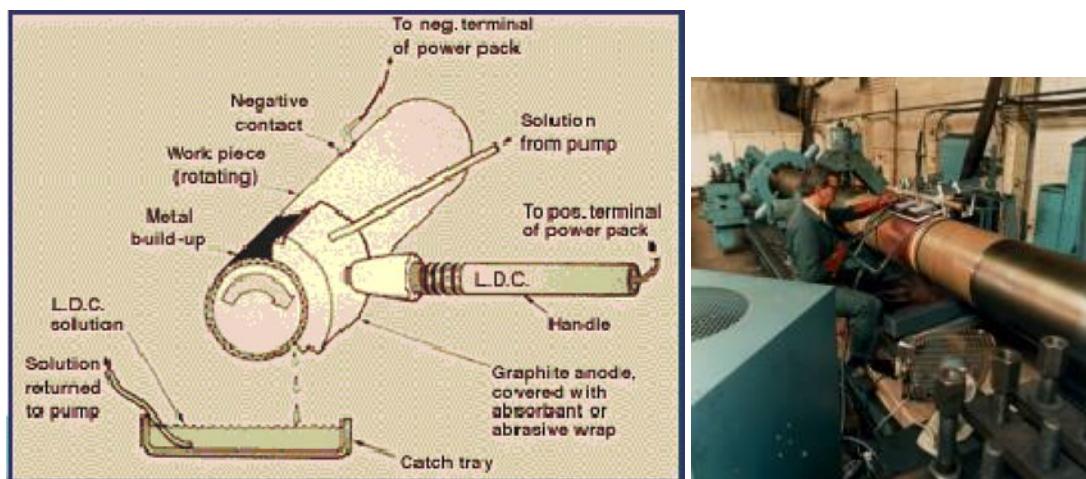
De metallische deklaag wordt aangebracht vanuit een elektrolyt. Dit elektrolyt kan zowel een waterige oplossing, een niet-waterige oplossing als een zoutsmelt zijn. Dit wordt bepaald door de aan te brengen deklaag. In principe kan elk metaal dat in een elektrolyt op te lossen is worden aangebracht. Ook 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 op kan treden 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 6.17. 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. Omdat machineonderdelen niet hoeven te worden uitgebouwd, zijn grote besparingen te behalen.

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. Verder kan uiteraard informatie bij de galvano-bedrijven worden ingewonnen. Adressen zijn onder andere via de VOM (<http://www.vom.nl>) en de branchevereniging NGO-SBG (<http://www.ngo-sbg.nl/>) verkrijgbaar.



Figuur 6.17 Tampongalvaniseren, principe (bron: Maasdijk Metaal)

6.6.1 Functionele eigenschappen

Elektrochemisch aangebrachte deklagen vinden brede toepassing. Tabel 6.8 geeft een overzicht van de eigenschappen van elektrochemisch en stroomloos aangebrachte metallische deklagen. Daarnaast worden functionele toepassingen genoemd.

Tabel 6.8 Functionaliteit van elektrochemisch en stroomloos aangebrachte metallische deklagen

	Hardheid (HV)	Electrisch geleidend vermogen	Soldeerbaarheid	Hechtingsondergrond	Corrosiebescherming	Zelfsmerend vermogen	Glijvermogen	Slijtvastheid	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				●	●				
Electroforese lagen				●	●				

NOOT:

Met de bolletjes wordt de toepasbaarheid van de verschillende deklagen aangegeven

Ook repareren is met galvanotechniek mogelijk. Voorbeelden zijn te vinden bij reparatie van gesleten machine-onderdelen. 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 deklaagdikten tot enkele millimeters mogelijk. De stuurparameters voor het bepalen van de laagdikte zijn:

- Ah-gewicht; de massa die wordt neergeslagen per A gedurende een uur (Faraday), vermenigvuldigd met het kathodisch rendement. Dit gedeeld door de dichtheid geeft het volume en vervolgens delen door het oppervlak geeft de laagdikte, mits gelijkmatig neergeslagen.
- Stroomdichtheid (A/dm^2).
- Tijd (h).

6.6.2 Ontwerpaspecten

Bij het ontwerpen van producten die voorzien moeten worden van een elektrolytisch aangebrachte deklaag moet rekening gehouden worden 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 kosten verhogend.

Voor het aanbrengen van een deklaag moet het basismateriaal in 'zicht' van een elektrode geplaatst kunnen worden. In blinde gaten en nauwe openingen kunnen geen (hulp) elektroden geplaatst worden. Bij smalle sleuven kunnen de veldlijnen afgeschermd worden. 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 van de vloeistofkolom op die plaats tussen werkstuk en anode is 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 zodanig maatregelen genomen worden dat deze achteraf kunnen leeg stromen en goed te reinigen zijn. Dit zijn uiteraard kosten verhogende maatregelen die bijvoorkeur vermeden moeten worden.

Basismateriaal

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

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 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 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)

Deklaagmateriaal

Naast de functionaliteit, die de keuze van de deklaag 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 deklaag voorzien kunnen worden. Voordat een deklaag op basis van de gewenste functionaliteit wordt gekozen zal daarom bij twijfel eerst met de applicateur overlegd moeten worden.

6.7 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).

De volgende vormen van stroomloze metaalafscheiding worden onderscheiden. Voor een beschrijving van deze processen wordt verwezen naar de VOM Vademecum, 2002.:

- 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 6.9. Nadeel van stroomloze metaalafscheiding is dat de badchemie doorgaans ingewikkelder is. Goed aanbrengen van deze deklagen vraagt daarom om veel expertise.

Tabel 6.9 *Metalen, waarbij stroomloze metaalafscheiding mogelijk is*
(VOM Vademecum, 2002).

Alle processen	Autokatalytisch	Niet-katalytisch	Contact	NOOT
Be ²⁾	-	-	-	1) De elementen zijn vermeld in volgorde van het periodiek systeem
Ti	Ti	-	Ti	
V	V	-	-	2) Geen nadere aanduiding in de literatuur.
Cr	Cr	Cr	Cr	
Mn	-	-	Mn	
Fe	Fe	Fe	Fe	
Co	Co	-	Co	
Ni	Ni	Ni	Ni	
Cu	Cu	Cu	-	
Zn	Zn	Zn	Zn	
Ga	-	-	Ga	
As	-	As	-	
Se	Se	-	-	
Zr ²⁾	-	-	-	
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	

6.7.1 Ontwerpaspecten

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

6.7.2 Voorbeelden toepassingen

Ter illustratie zijn 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 halfgeleiderelementen, 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 afvulapparatuur met chemisch nikkel.
- Talrijke toepassingen zijn er in de luchtvaart: flenzen, bouten, onderdelen van gyroscopen, kleppen, turbine-assen en tal van andere toepassingen.
- In de algemene machinebouw treft men aan onderdelen van draaibanken, hefbomen,
- 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.

Voor meer informatie over de eigenschappen en functionaliteit wordt verwezen naar Tabel 6.8.

6.8 Badprocessen

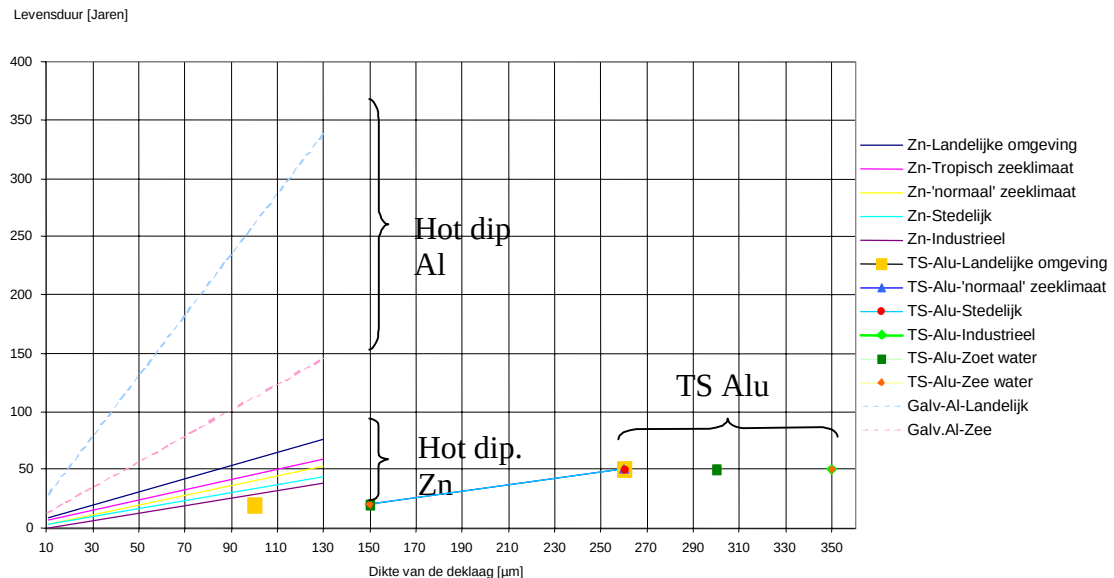
De hier kort behandelde thermische badprocessen betreffen het aanbrengen van deklagen door onderdompeling in een bad met gesmolten metaal. Doorgaans zijn dit laagsmeltende metalen en legeringen van:

- 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). Echter, de corrosiebescherming van 55Al-Zn deklagen is lager dan van aluminium type 2 deklagen.

Over het algemeen worden deze deklagen aanbracht voor corrosiebescherming, waarbij kathodische bescherming het mechanisme is. Dit betekent dat de deklaag zich opoffert ten

gunste van het basismateriaal. De deklaagdikte heeft daarmee een relatie met de maximale periode waarover de deklaag bescherming kan bieden. In Figuur 6.18 is dit aangegeven voor galvanisch aangebrachte Zn-deklagen en Al-type 2-deklagen. (Type 2 aluminium deklagen bestaan uit commercieel zuiver aluminium). De zink- en aluminiumlaagdikte wordt meestal uitgedrukt in deklaagmassa in g/m^2 . Ter vergelijking zijn tevens enkele resultaten voor thermisch gespoten aluminium lagen, TS-Alu, opgenomen. Deze zijn overgenomen uit de publicatie Toepassing van Thermisch Gespoten Aluminiumlagen (TI.05.25) van dit project.



Figuur 6.18 *Relatie tussen de zinklaagdikte, aluminiumlaagdikte en de levensduur. Ter vergelijking zijn de gewenste laagdikte voor thermisch gespoten aluminium weergegeven (ASM Handbook Vol 5, 1992; Ros, D, 2004)*

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 aluminiumdeklagen worden aangebracht via een dompelproces. Het product dat van een deklaag voorzien moet worden 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 Toepassing van Thermisch Gespoten Aluminiumlagen in dit project en het hoofdstuk over thermisch spuiten in deze publicatie.

6.8.1 Ontwerpaspecten bij thermisch verzinken en aluminiseren

Voor het aanbrengen van aluminium deklagen 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 gehouden worden met, zie Tabel 6.10:

- de badtemperatuur,
- gewenste laagdikte,
- chemische samenstelling van het basismateriaal. Bij een basismateriaal met een hoog silicium gehalte (boven 0,05%) zal de aangroeisnelheid van een thermische zinklaag hoger zijn. Andere elementen die voor goed galvanische verzinken beperkt moeten blijven zijn koolstof (max 0,25%), fosfor (max 0,05%) en mangaan (max 1,3%). Hoewel materialen met hogere verontreinigen wel verzinkt kunnen worden, maar dit vraagt extra maatregelen,
- galvanisch contact met andere materialen,
- geometrie van de constructie, gebruikstemperatuur.

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

Tabel 6.10 *Parameters en aspecten bij thermische badprocessen*

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 rekristallisatie wijzigen. Vermoeiingseigenschappen kunnen verslechteren. Met name van silicium gekalmeerd staal is dit bekend bij thermisch verzinken.
Laagdikte:	<i>Zink</i> : De als gangbaar aanbrachte laagdikte. Voor Zinkdeklaag is dit ca 20 µm voor continu gecoate 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
	<i>Aluminium</i> : 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 gehouden worden 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/uitstroom openingen 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	<i>Zink</i> : Maximaal 260°C <i>Aluminium</i> : 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 aluminium-oxide kan dan een uitstekende bescherming tegen gascorrosie (oxidatie) geven
Chemisch samenstelling basismateriaal	<i>Zink</i>	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

7. 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 zonet 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,
- bedrijfskosten van het gecoat product, waaronder 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 en/of deklaagtechniek. 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 gedacht moet worden. Waar van toepassing zal per deklaagtechniek nog een nadere toelichting gegeven worden.

7.1 Overwegingen bij het opmaken van de kostenvergelijking:

7.1.1 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 gehouden worden met thermische belasting van het product, wat deze fase hierin meer vrijheden zal geven. Oplossen daar en tegen 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 voorzien kunnen worden. Bij het ontwerp moet hiermee rekening gehouden worden wat kosten verhogend 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. Thermische deklaaglaagprocessen ondervinden hier geen problemen bij. 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 bad achterblijven kan in een later stadium, bij gebruik, corrosie optreden.

7.1.2 Proceskosten

Tabel 7.1 geeft een indicatieve vergelijking voor de kosten per deklaagtechniek. Voor dunne deklagen 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.

Tabel 7.1 *Vergelijking tussen de kosten voor het coaten per deklaagtechniek*

	Kosten	
	Apparatuur	Aanbrengen
Thermisch spuiten	laag-hoog*	laag-gemidd*
Oplassen	laag-gemidd	laag-hoog
Lasercladden	gemidd-hoog	laag-gemidd
Explosiefcladden	laag-hoog	laag-hoog
Elektrochemische deklagen		
Stroomloos thermisch aangebrachte deklagen	gemidd-hoog	laag
CVD (ter vergelijking)	gemidd	laag-gemidd
PVD (ter vergelijking)	gemidd-hoog	gemidd-hoog

NOOT:

*: Sterk afhankelijk van gebruikte techniek (zie Tabel 7.3)

Oplassen

Elektroslaklassen met band is interessant voor werkstukken met een minimum oppervlak van 220 mm². De minimale inwendige diameter voor werkstuk stukken is 350 mm (met een kleine lassen/kop) en de minimale plaatdikte is 30 mm. Een stationaire opstelling is hierbij een voorwaarde.

Overgangszone tussen het oorspronkelijke moedermateriaal 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 hier een rekenvoorbeeld gegeven voor het elektroslaklassen met band (peildatum 1 januari 2005), Tabel 7.2.

Tabel 7.2 *Voorbeeld van proceskostenberekening voor het elektroslaklassen met band*

Neersmeltgegevens	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 laserbewerking is, dat gesteld wordt dat laserbewerkingen weinig energiezuinig zijn. Dit is een discutabele stelling.

CO₂-lasers en Nd:YAG-lasers hebben een betrekkelijk gering elektrisch rendement; het rendement van diodelasers en in de toekomst te verwachten fiberlasers ligt aanzienlijk hoger:

- CO₂-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. De levensduur wordt aanzienlijk verlengd en/of de voor- en nabewerkingskosten van producten zijn aanzienlijk minder.

Thermisch spuiten

Bij het aanschaffen van een thermisch spuitstelsel 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 Hoofdstuk 9.3 Milieuaspecten Thermisch spuiten)

Door de grote variatie in spuitapparatuur zijn er grote verschillen in proceskosten tussen de verschillen thermisch spuittechnieken. In Tabel 7.3 is een indicatie van de relatieve proceskosten per spuittechniek in relatie tot elkaar gegeven 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 gekeken moet worden en daarna pas naar de proceskosten. Het duurste proces zal niet voor elke toepassing de beste deklaag opleveren.

Tabel 7.3 *Relatieve proceskosten en deklaagkarakteristiek per thermisch spuittechniek (Davis J.R., 2004)*

Spuitproces	Relatieve proceskosten ¹⁾	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	0,1
Atmosferisch plasma spuiten (APS)	5	6	hoog	0,5-1
High Velocity Oxygen Fuel (HVOF)	5	8	zeer hoog	0,2
Cold Spray	6 ²⁾	8	zeer hoog	< 0,1-0,5
Vacuüm plasma spuiten (VPS)	10	9	zeer hoog	<10 ⁻⁶
Detonatie spuiten (D-gun)	10	8	zeer hoog	0,1

NOOT:

¹⁾: 1 = Lage kosten, 10 = hoge kosten

²⁾: 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 rek mogelijkheid 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. Echter het proces is 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 weggeschuurd). 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.

7.1.3 Onderhoudskosten bij de selectie van een deklaag

Bij de keuze van een deklaag moet men rekening gehouden met te verwachten onderhoud. Onderhoudskosten zijn meestal de grootste kostenpost bij het bedrijven 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, 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,
- 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 deklagen 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.

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

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.

7.1.4 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 bedreven worden doordat bijvoorbeeld:

- De mechanische belasting verhoogd kan worden (verminderde slijtage). Denk daarbij aan de deklagen die op gereedschappen worden toegepast (zie publicatie Dunnen deklagen op gereedschappen op www.coating-online.nl).
- De thermisch belasting hoger kan worden. Denk daarbij bijvoorbeeld aan de TBC-deklagen op turbine schoepen waardoor gasturbines op hogere temperaturen kunnen werken.
- Verhoging van de betrouwbaarheid. Hiervoor worden veel deklagen in de automobiellindustrie toegepast.
- Verbetering van de reinigbaarheid van het oppervlak. Vuil blijft minder op het oppervlak zitten.

7.1.5 Verwijderingskosten

Aan het einde 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 kunnen leiden tot extra kosten of niet hangt daarbij onder andere er van af of de deklaag eenvoudig is te verwijderen. De combinatie van moeilijk te verwijderen deklagen en ongewenste materiaalcombinatie bij recycling kunnen kosten verhogend 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 kosten verhogend werken.
- Gealuminiseerd staal levert mogelijk minder problemen op. Aluminium wordt in de staal industrie toegepast bij het kalmeren van de smelt en desoxidant. Zekere hoeveelheden zullen dus toegestaan zijn bij recycling.
- Chroom/nikkel (molybdeen-houdende) 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.

7.1.6 Milieukosten

In Hoofdstuk 9 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 daar en tegen, mits juist toegepast, zal de deklaag niet of nauwelijks corroderen. Als de aluminiumdeklaag toch zijn kathodische bescherming gaat geven, worden corrosieproducten gevormd die inert zijn, het milieu daarmee 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 milieu maatregelen getroffen worden. De organische coating moet namelijk in zijn geheel gestript worden, wat met gritstralen gebeurt. Grit en afgestraalde 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 milieu belastend.

8. Normen en normering

8.1 Algemene normen

Een overzicht van recente normen op het gebied van deklaagtechnologie kan men raadplegen op de website het NEN: <http://www.NEN.nl>. Via deze website kunnen normen worden besteld en samenvattingen worden ingezien. In deze publicatie zijn enkele van deze normen opgenomen.

NEN-EN-ISO 1463	Metaal- en oxidebedekkingen Meting van de laagdikte. Microscopische methode Editie: januari 1998
NEN-EN-ISO 3882	Metallische en andere niet-organische deklagen. Overzicht van methoden voor het meten van de dikte. Ontwerp januari 2000
niet-destructieve	Split beam microscope (ISO 2128) Magnetic (ISO 2178 and 2361) Eddy current (ISO 2360) X-ray spectrometric (ISO 3497) Beta backscatter (ISO 3543)
Destructieve	Microscopical (ISO 1463) Fizeau multiple-beam interferometry (ISO 3868) Profilometric (ISO 4518) Scanning electron microscope (ISO 9220) Dissolution methods Gravimetric strip and weigh method and gravimetric analytical (ISO/DIS 10111) Coulometric method (ISO 2177)

NEN-EN-ISO 10308	Metallische deklagen. Overzicht van poreusheidproeven Editie: september 1997
Normatieve verwijzing	ISO 1456: 1988 Metallic coatings – Electrodeposited coatings of nickel plus chromium an of copper plus nickel plus chromium
	ISO 2080: 1981 Electroplating and related processes – Vocabulary
	ISO 2085: 1976 Anodizing of aluminium and its alloys – Check of continuity of thin anodic oxide coatings – Copper sulphate test
	ISO 3160: 1992 Watch cases and accessories – Gold alloy coverings – Part 2: determination of fineness, thickness, corrosion resistance and adhesion
	ISO 4524: 1985 Metallic coatings – Test methods for electrodeposited gold and gold alloy coatings – Part 2: Environmental tests
	ISO 4524: 1985 Metallic coatings – Test methods for electrodeposited gold and gold alloy coatings – Part 3: Electrographic tests for porosity
	ISO 4525: 1985 Metallic coatings – Electroplated coatings of nickel plus chromium on plastics materials
	ISO 4526: 1984 Metallic coatings – Electroplated coatings of nickel for engineering purpose
	ISO 4527: 1987 Autocatalytic nickel-phosphorus coatings – Specification and test methods
	ISO 4538: 1978 Metallic coatings – Thioacetamide corrosion test (TAA test)
	ISO 4540: 1980 Metallic coatings – Coatings cathodic tot the substrate – Ratings of electroplated test specimens subjected tot corrosion tests
	ISO 4541: 1978 Metallic and other non-organic coatings – Corrodkote corrosion test (CORR test)
	ISO 6158: 1984 Metallic coatings- Electroplated coatings of chromium for engineering purposes
	ISO 6988: 1985 Metallic and other non-organic coatings – Sulfur dioxide test with general condition of moisture
	ISO 9227: 1990 Corrosion tests in artificial atmospheres – Salt spray tests
	ISO 10309 Metallic coatings-Porosity tests - Ferroxy test

8.2 Oplassen

Kwaliteitsborging bij het lassen.

NEN-EN-ISO 3834-1	Kwaliteitsborgingseisen voor lassen. Smeltlassen van metallische materialen. Deel 1: Richtlijnen voor keuze en toepassing
NEN-EN-ISO 3834-2	Deel 2: Uitgebreide kwaliteitseisen
NEN-EN-ISO 3834-3	Deel 3: Standaard kwaliteitseisen
NEN-EN-ISO 3834-4	Deel 4: Elementaire kwaliteitseisen
NEN-EN-ISO 14731	Lascoördinatie - taken en verantwoordelijkheden
NEN-EN-ISO 5817	Lassen – Smeltlasverbindingen in staal, nikkel, titanium en hun legeringen – kwaliteitsniveau's voor onvolkomendheden.
NEN-EN-ISO 15614-1	Het beschrijven en kwalificeren van lasprocedures voor metallische materialen. Deel 1: Lasmethodebeproeving voor het booglassen van staal.
NEN-EN-ISO 287-1	Het kwalificeren van lassers – Smeltlassen. Deel 1: Staal

8.3 Lasercladden

Normen gerelateerd aan Arbo en Veiligheid:

NEN-EN 60825	Veiligheid van Laserproducten. Apparatuurclassificaties, eisen en gebruikershandleiding
NEN-EN 12626	Veiligheid van Machines. Machines, die gebruik maken van Lasers- Veiligheidseisen
NEN-EN 12254	Afschermingen voor werkplekken Veiligheidseisen en beproeving

8.4 Explosief cladden

Zie standaard normen voor cladlagen in het algemeen

8.5 Electrolytische processen

NEN-EN-ISO 4521:2003 Ontw. en	Metallieke deklagen - Elektrolytisch aangebrachte deklagen van zilver en zilverlegeringen voor functionele toepassingen - Specificatie en beproevingsmethoden
NEN-EN-ISO 4523:2003 Ontw. en	Metallieke deklagen - Elektrolytisch aangebrachte deklagen van goud en goudlegeringen voor elektrische, elektronische constructiedoeleinden
NEN-EN-ISO 10308:2003 Ontw. en	Metallieke deklagen - Overzicht van porositeitsbeproeving
NEN-ISO 4524-2:2000 en	Metallieke deklagen - Beproevingsmethoden voor elektrolytisch aangebrachte deklagen van goud en goudlegeringen - Deel 2: Klimaatbeproevingen met stromende gemengde gassen (MFG)
NEN-EN 13438:1999 Ontw. en	Organische poederdeklagen voor gegalvaniseerde stalen producten voor constructiedoeleinden
NEN-EN-ISO 10308:1997 en	Metallieke deklagen - Overzicht van poreusheidsproeven
NEN-EN-ISO 4524-3:1995 en	Metallieke deklagen - Beproevingsmethoden voor elektrolytisch aangebrachte deklagen van goud en goudlegeringen - Deel 3: Elektrografische beproevingen op porositeit
NEN-EN-ISO 4524-6:1994 en	Metallieke deklagen - Beproevingsmethoden voor elektrolytisch aangebrachte deklagen van goud en goudlegeringen - Deel 6: Bepaling van de aanwezigheid van restzouten
NEN-EN-ISO 2819:1994 en	Metallieke deklagen op metallieke oppervlakken - Elektrolytisch en chemische aangebrachte deklagen - Overzicht van de methoden voor de beproeving van de hechting
NEN 2170:1970 nl	Bepaling van de poreusheid van galvanische bedekkingen met nikkel of met nikkel en chroom, met de ferroxylproef

8.6 Thermisch spuiten

NEN-EN-ISO 17836:2004 en	Thermisch spuiten - Bepaling van het depositierendement van thermisch spuiten
NEN-EN 1274:2004 en	Thermisch spuiten - Poeders - Samenstelling, technische leveringsvoorwaarden
NEN-EN 14616:2004 en	Thermisch spuiten - Aanbevelingen voor thermisch spuiten
NEN-EN 14665:2004 en	Thermisch spuiten - Thermisch gespoten deklagen - Symbolische weergave op tekeningen
ISO 17836:2004 en	Thermisch spuiten - Bepaling van het depositie-rendement van thermisch spuiten
NEN-EN-ISO 17834:2003 en	Thermisch spuiten - Deklagen voor bescherming tegen corrosie en oxidatie bij verhoogde temperaturen
NEN-EN-ISO 14923:2003 en	Thermisch spuiten - Karakterisering en beproeving van thermisch gespoten deklagen
NEN-EN 657:2003 Ontw. en	Thermisch spuiten - Terminologie, classificatie
NEN-EN-ISO 2063:2002 Ontw. en	Thermisch spuiten - Metallieke en andere niet-organische deklagen - Zink, aluminium en hun legeringen
NEN-EN-ISO 14924:2002 Ontw. en	Thermisch spuiten - Voor- en eindbehandeling van thermisch gespoten deklagen
NEN-EN-ISO 14921:2002 en	Thermisch spuiten - Procedures voor het aanbrengen van thermisch gespoten deklagen voor machine-onderdelen
NEN-EN-ISO 14919:2001 en	Thermisch spuiten - Draden, staven en snoeren voor vlam- en boogspuiten - Indeling - Technische leveringsvoorwaarden
NEN-EN 13507:2001 en	Thermisch spuiten - Voorbehandeling van oppervlakten van metalen delen en onderdelen voor thermisch spuiten
ISO 14231:2000 en	Thermisch spuiten - Aanvaardbaarheidskeuring van apparatuur voor thermisch spuiten
ISO 14232:2000 en	Thermisch spuiten - Poeders - Samenstelling en technische leveringsvoorwaarden
NEN-ISO 14917:1999 en	Thermisch spuiten - Terminologie, classificatie
NEN-EN-ISO 14713:1999 nl	Bescherming van ijzer en staal in constructies tegen corrosie - Zink en aluminium deklagen - Leidraad
NEN-EN-ISO 14922-1:1999 en	Thermisch spuiten - Kwaliteitseisen voor thermisch gespoten onderdelen - Deel 1: Leidraad voor de keuze en de toepassing
NEN-EN-ISO 14922-2:1999 en	Thermisch spuiten - Kwaliteitseisen voor thermisch gespoten onderdelen - Deel 2: Uitgebreide kwaliteitseisen
NEN-EN-ISO 14922-3:1999 en	Thermisch spuiten - Kwaliteitseisen voor thermisch gespoten onderdelen - Deel 3: Standaard-kwaliteitseisen
NEN-EN-ISO 14922-4:1999 en	Thermisch spuiten - Kwaliteitseisen voor thermisch gespoten onderdelen - Deel 4: Elementaire kwaliteitseisen
NEN-EN-ISO 14920:1999 en	Thermisch spuiten - Spuiten en samensmelten van zelfvloeiende legeringen
NEN-EN-ISO 14713:1999 en	Bescherming van ijzer en staal in constructies tegen corrosie - Zink en aluminium deklagen- Leidraad
NEN-EN-ISO 14918:1998 en	Thermisch spuiten - Het kwalificeren van thermische spuiters
NEN-EN 1395:1996 en	Thermisch spuiten - Afnamekeuring van apparatuur voor thermisch spuiten
NEN-EN 582:1994 en	Thermisch spuiten - Bepaling van de hecht-treksterkte
NEN-ISO 2063:1993 en	Metallieke en andere niet-organische deklagen - Thermisch spuiten - Zink, aluminium en hun legeringen

9. Milieu en arbo-aspecten

9.1 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 metaal en elektrotechnische industrie' is gratis (voor leden?) te downloaden van <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, echter bij extreme blootstelling kan de schade permanent worden.
- *Lasrook*: bij het lassen en snijden van metalen komt 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 Maximaal Aanvaarbare Concentratie, de zogenaamde MAC-waarde. De MAC-waarde voor lasrook van ongelegeerd staal is 3,5 mg/m³ lucht. Als hulpmiddel voor het overheidstoezicht en – handhaving is een Arbobeidsregel 4.9-2 opgesteld. Van de website van FME/CWM <http://www.lasrook-online.nl> zijn verschillende publicaties te downloaden, o.a. de Praktijkrichtlijn aan de hand waaraan 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/maatregelen. De maatregelen bestaan uit de volgende stappen:
 - aanpak van de bron (bv. ander 'schoner' lasproces),
 - bronafzuiging / ruimteventilatie,
 - scheiding van mens en bron,
 - persoonlijke adembeschermingsmiddelen (PBAM).De Arbobeidsregel 4.9-2 geeft een praktische invulling van de Arbowetgeving in werkplaatssituaties. Deze is in te zien op de website van de FNV Bureau Beroepsziekten: <http://www.bbzfnn.nl/>. Bijvoorbeeld schadelijke bestanddelen en/of verbindingen van Cr^{VI} en Ni en ozon. Lasrook moet afgezogen en gefilterd worden. Cr^{VI} 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).

9.2 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, dat deze een zodanig vermogen heeft, dat deze geen gevaar oplevert (vermogen < 1 mW).

Indien echter de operator en anderen zich in de nabijheid van de laserbundel kunnen bevinden, dienen adequate maatregelen te worden genomen, dat geen onveilige situaties kunnen ontstaan.

Voor het veilig werken is daarom

- Het dragen van een goede laserbril en eventueel. beschermende kleding 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 CO₂-lasers wordt laserstraling gegenereerd die onzichtbaar is voor het menselijk oog. De straling van CO₂-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 gebruikt 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 basismateriaal. Ten alle tijden moet voor een goede afzuiging worden gezorgd, waardoor metaaldampen en damp- en rookontwikkeling als gevolg van de aanwezigheid van vuil en vet op de interactieplaats worden afgezogen.
- Het metaalpoeder moet een dermate deeltjesgrootte hebben, zodat dit niet kan gaan zweven en daardoor eventueel ingeademd kan worden. Deeltjes dienen daarom groter dan 10 µm te zijn.

9.3 Thermisch spuiten

Bij thermisch spuiten zijn de volgende milieu en ARBO aspecten van belang:

- Geluid: Afhankelijk van de thermisch spuittechniek die wordt gebruikt ligt het geluidsniveau tussen ca 130-180dBa. Een geluidsafscherming is bij het werken met thermisch spuitsystemen daarom vereist. Indien op locatie wordt gewerkt zal de werkplek afgeschermd moeten worden en moeten de spuiters afdoende persoonlijke beschermingsmiddelen gebruiken.
- Licht: Bij met name plasma-spuiten 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 zogenaamde 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 genomen te worden.
- Hitte: De thermische spuitvlam is extreem heet.
- Milieubelasting: De belangrijkste vorm van milieu belasting zijn de vrijkomende deeltjes. Bij een goed werkend afzuigstelsel is dit probleem uitstekend te ondervangen. De deeltjes kunnen in principe vrijkomen:
 - tijdens het spuiten,
 - schoonmaken van de afzuiginstallatie,
 - vullen van de poedervoeder,
 - afvoeren van het afval.

9.4 Explosief cladden

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

- geluid (explosie),
- luchtdruk (explosie).

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

9.5 Elektrolytische processen (Galvanotechniek)

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

- Afvalwater. Deze mag niet zondermeer geloosd worden. Voor de zuivering moet aan strenge eisen worden voldaan. Afvalwater komt onder andere voort uit 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 komen in uit baden met zoutzuur, salpeterzuur en alle cyanidische baden.
- Nevel. Chroombaden, anodiseerbaden, elektrolytische ontvettingbaden geven tijdens gebruik gevaarlijke en hinderlijke nevels af.

9.6 Badprocessen

- hoge temperatuur. (er is sprake van gesmolten metalen),
- metaaldampen.

10. Voorbeelden van toepassingen

10.1 Oplassen

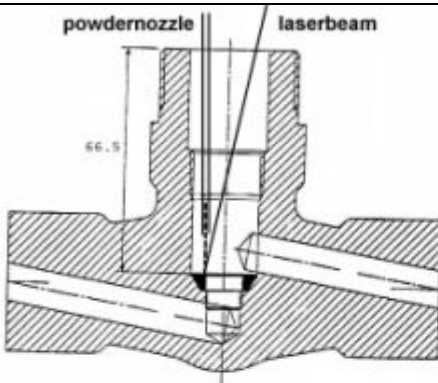
In het voorlichtingsblad VM108 worden al veel voorbeelden genoemd. Hiernaar wordt dan ook verwezen voor meer voorbeelden

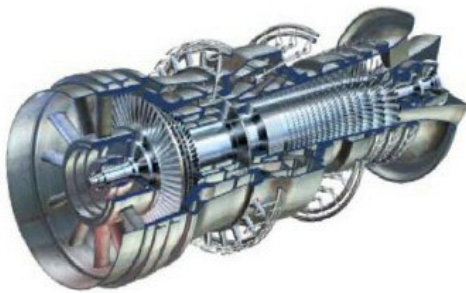
Voorbeeld 1		
<i>Industrie</i>	<i>Petrochemie</i>	
<i>Onderdeel/product</i>	Hydrocracker/Bodemplaat afmetingen ca 1200 mm rond	
<i>Toepassing</i>	Brandstofproductie	
<i>Functionaliteit/Applicatie</i>	Ontzwaveling	
<i>Gebruikscondities</i>		
<i>Probleem</i>	Basismateriaal moet beschermd worden tegen waterstof	
<i>Oplossing (deklaag)</i>	deklaagtechniek	ES-bandlassen
	type deklaag	AISI 347 type 1 langs oplassing op 10CrMo910 met hoge snelheids poeder
<i>Ontwerpaspecten</i>		
		

Bron: Soudokay, België

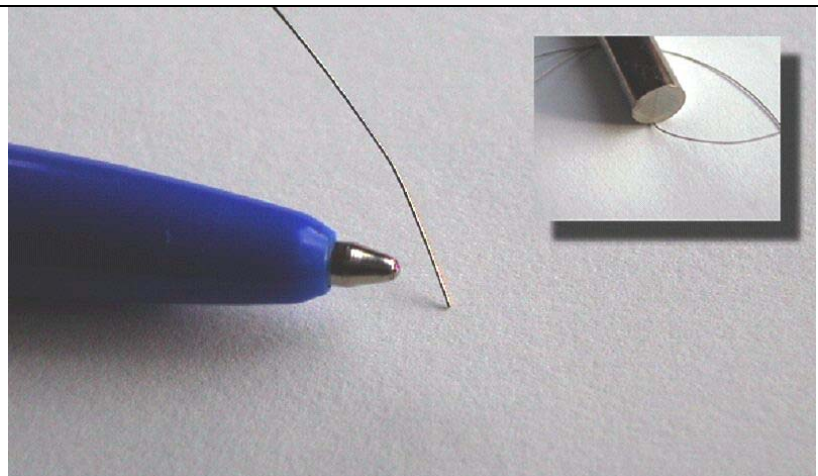
10.2 Lasercladden

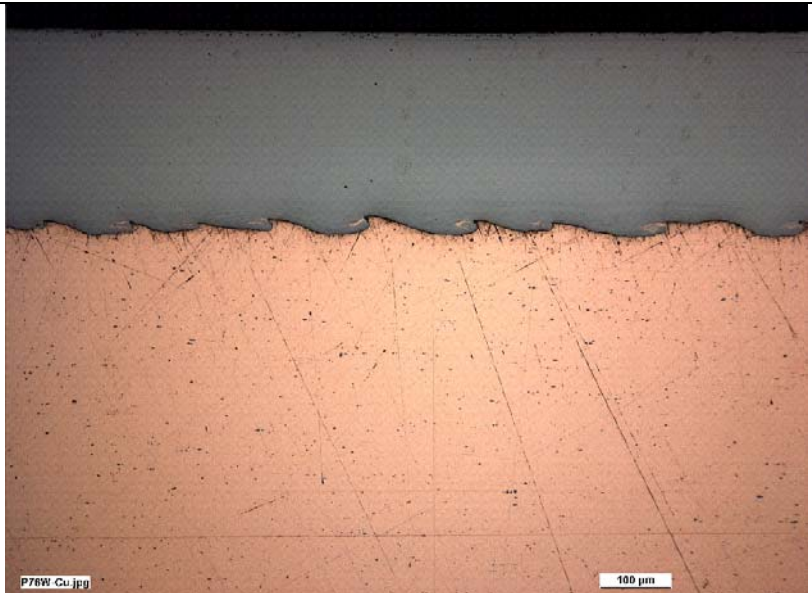
Voorbeeld 2		
Industrie	Procesindustrie	
Onderdeel/product	BOB-valve	
Toepassing	Gastransport	
Functionaliteit/Applicatie	Afsluiten	
Gebruikscondities	Gastransport chloor en zwavelhoudend, omgevingstemperatuur	
Probleem	Spleetcorrosie tast de afdichtingsvlakken aan waardoor lekkage op is getreden Basismateriaal: 0,3-0,4% smeedstaal	
Oplossing (deklaag)	deklaagtechniek	Lasercladden
	type deklaag	inc625 type deklaag. Dit materiaal heeft een hoge weerstand tegen spleetcorrosie
Ontwerpaspecten	- Hechting op basis van lasproces - Minimale warmte-inbreng resulterend in een beperkte WBZ - Geringe opmenging - Vormbehoud door minimale warmte-inbreng - Uitstekende corrosiebestendige eigenschappen - Gekwalificeerd door NAM voor zoet en zuur aardgas	
Foto's		
		
Bron; Nedclad		

Voorbeeld 3		
Industrie	Proces	
Onderdeel/product	Plugafsluiter	
Toepassing		
Functionaliteit/Applicatie	Slijtvaste zitting	
Gebruikscondities	--	
Probleem	Slijtage van een zitting welke inwendig zit. De toegankelijkheid is moeilijk	
Oplossing (deklaag)	deklaagtechniek	lasercladden
	type deklaag	Stellite 21
Ontwerpaspecten	- Hechting op basis van lasproces - Toegankelijkheid kleine boringen - Minimale warmte-inbreng resulterend in een beperkte WBZ - Geringe opmenging - Vormbehoud door minimale warmte-inbreng - Zeer goede slijtvastheid	
Foto's		
   		
Bron: Nedclad		

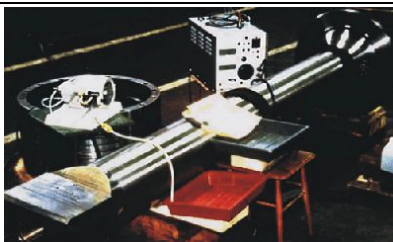
Voorbeeld 4		
Industrie	Luchtvaart-Gasturbine	
Onderdeel/product	Monokristallijn turbineblad (Single Kristal, SX, -turbine blade)	
Toepassing	Reparatie	
Functionaliteit/Applicatie		
Gebruikscondities		
Probleem	Slijtage van het turbineblad. Vervanging van deze bladen is zeer duur en het materiaal is moeilijk op te lassen. Voor de reparatie is een epitaxiale laag nodig.	
Oplossing (deklaag)	deklaagtechniek	Lasercladden. (diode laser) Opgelast met een rechthoekige laserbundel van 21x5 mm.
	type deklaag	conform basismateriaal
Ontwerpaspecten	Lage warmte-inbreng Lokale reparatie op een scherpe overgang Smalle rand	
Foto's		
		
ALSTOM GT26 Gasturbine	Lasercladden	Doorsnede opgelaste rand
Bron: Rofin		

10.3 Explosief cladden

Voorbeeld 5		
Industrie	Elektronica	
Onderdeel/product	Elektrisch geleidende draad	
Toepassing	(hoog frequent) elektrische geleiding	
Functionaliteit/Applicatie	Elektische geleiding	
Gebruikscondities	Elektronica, atmosferisch	
Probleem	Hoge kosten van legeringselementen, met name Ag en Pd. Doel is kosten reductie.	
Oplossing (deklaag)	deklaagtechniek	Explosief cladden gevolgd door draadtrekken van geclad product
	type deklaag	Zilverlegering
	Basismateriaal	AISI301 staaf
Foto 10.1 toont een draad die werd getrokken nadat een RVS301-staaf was bekleed met een, goed elektrisch geleidende zilverlegering (zie insert). Dit toont aan dat de hechting van explosief aangebrachte deklagen zeer sterk en tevens ductiel is. De 10 mm dikke stalen staaf werd in het draad trekproces in diameter gereduceerd tot 0.2 mm. Hierbij nam de dikte van de zilveren deklaag af van 0.3 mm naar slechts 8 micrometer. Deze draad heeft de sterkte van RVS301, maar de (voor hoge frequenties) optimale electrische geleidingseigenschappen van de zilver-legering. Doordat dure legeringselementen (Ag, Pd) alleen daar worden toegepast waar ze voor hun functioneren nodig zijn, is tevens een kostenreductie bereikt t.o.v. een homegene zilverdraad.		
Ontwerpaspecten		
Foto's		
Foto 10.1: Draad getrokken van een met een zilverlegering beklede RVS301 staaf (laagdikte coating 8 micron). Tijdens het explosief cladden van de staaf bedroeg de wanddikte van de zilverbuis 0.3 mm en de diameter van de RVS staaf 10 mm (zie insert).		

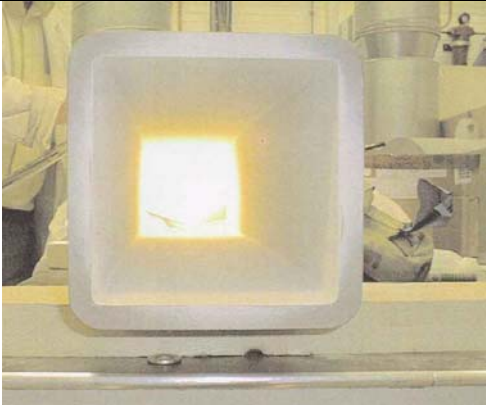
Voorbeeld 6		
Industrie	Proces industrie	
Onderdeel/product	Branders en ovens	
Toepassing	Hoge thermische en elektrische geleiding in branders, ovens en plasma's	
Functionaliteit/Applicatie	Bescherming tegen hoge thermisch belasting	
Gebruikscondities	Hoge temperatuur (plasma's) aan het oppervlak	
Probleem	Koper voldoet aan de thermisch en elektrische eisen, echter zal aan het oppervlak smelten bij de hoge temperatuur. Het koper moet aan het oppervlak worden beschermd tegen de hoge temperatuur.	
Oplossing (deklaag)	deklaagtechniek	Explosief cladden van folie
	type deklaag	Wolfram
	Basismateriaal	Koper
Koper is een veelgebruikt materiaal vanwege de goede elektrische en warmte geleidingseigenschappen. Echter bij extreem hoge thermische belasting (branders, ovens, plasma's) kan het oppervlak van het koper gaan smelten. Om dit te voorkomen is het oppervlak hiertegen beschermd door het explosief bekleden met een wolfraam (W) folie. Foto 10.2 toont een cladding van een 0.3 mm dik wolfraamfolie op OFHC-koper. Het koper kan b.v. door water koeling op een voldoende lage temperatuur worden gehouden, terwijl het oppervlak toch een hoge temperatuur kan verdragen.		
Ontwerpaspecten		
Foto's		
Foto 10.2: Doorsnede van een koper oppervlak dat met een wolfraam folie (0.3 mm dikte) is bekleed		

10.4 Galvanische processen

Voorbeeld 7		
Industrie	Grafische industrie,aandrijftechniek, hydraulische onderdelen, off-shore.	
Onderdeel/product	Aspassingen,corrosiebestrijding,slijtageverbetering	
Toepassing	Tampongalvaniseren (spot plating)	
Functionaliteit/Applicatie	Aanbrengen beschermende metaallaag	
Gebruikscondities	Op locatie aan te brengen, geen grote baden nodig	
Probleem	Dunne laagdiktes, handmatig proces, geen warmteinbreng, geen veranderingen basismateriaal	
Oplossing (deklaag)	Elektrolytische deklaag	Aanbrengen veel verschillende metalen mogelijk
Ontwerpaspecten	Vooral geschikt voor plaatselijke materiaalverbetering van grote onderdelen	Reparatie van beschadigingen, vaak zonder demontage onderdeel
Foto's		
		
Anti-seize koperlaag op schroefdraad	Plaatselijk bewerken van schroefas onder keur	Gerepareerde lagerpassing
Bron: Maasdijkmetaal nv		

10.5 Thermisch spuiten

In de voorlichtingsbladen VM95 en VM108 worden al veel voorbeelden genoemd. Hiernaar wordt dan ook verwezen voor meer voorbeelden

Voorbeeld 8		
Industrie	Staalindustrie	
Onderdeel/product	Gietgoot continu gietmachine	
Toepassing	Gieten van staal met laag koolstof	
Functionaliteit/Applicatie	Gietvorm en warmte-afvoer van gesmolten staal	
Gebruikscondities	ca 1800°C Gesmolten staal (zeer erosief/abrasief)	
Probleem	Voor de smering is altijd grafiet toegepast. Grafiet smering wordt in kleine hoeveelheden in het gesmolten staal opgenomen en zorgt voor een verhoging van het koolstofgehalte. Een deklaag moet dit probleem oplossen. Door de erosieve/abrasieve werking van het staal is de koperen gietgoot niet onbeschermd toe te passen.	
Oplossing (deklaag)	deklaagtechniek	Atmosferisch plasma spuiten (APS)
	type deklaag	Yttrium-oxide gestabiliseerd zirconium-oxide
Ontwerpaspecten	- Toegankelijkheid: de deklaag moet inwendig in een opening van ca 200 mm worden aangebracht - de deklaag moet non-sticking eigenschappen hebben	
Foto's		
		
Bron: ECN/Corus		

Voorbeeld 9		
Industrie	SCHEEPVAART	
Onderdeel/product	Klepsteel en zuigerklep	
Toepassing	Dieselmotor	
Functionaliteit/Applicatie		
Gebruikscondities	Verbrandingsgassen dieselmotor	
Probleem	De klep is onderhevig aan slijtage en hoge thermisch e belasting. De hoge temperatuur veroorzaakt een wijziging in de mechanische eigenschappen van het basismateriaal	
Oplossing (deklaag)	deklaagtechniek	Atmosferisch plasma spuiten (APS)
	type deklaag	Combinatie van een thermal barrier coating (YSZ) als onderlaag met een toplaag van Chroomoxide als slijtagebestendige laag
Ontwerpaspecten	- slijtvasteid - hoge temperatuur bestendigheid - Afronding langs de klep - lage warmte-inbreng	
Foto's		
		
Bron: ECN		

Referenties

- Buter, J.E., Th. J. Verheiden: *Corrosie en slijtvaste oppervlaktelagen*, FME/CWM VM108, november 1997, ISBN 90-75740-08-5
- Davis, J.R.: *Handbook of Thermal Spray Technology*, ASM Thermal Spray Society, 2004, ISBN 0-87170-795-0
- FME/CWM: *Oppervlaktebehandeling met hoog vermogen lasers*, PA.02-13, 2002
- Houben, J.M., D. v.d. Torre: *Thermisch Spuiten*, FME VM95, november 1992, ISBN 90-71306-55-0
- 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
- Klis, T. van der: *Vademecum Oppervlakte technieken metalen*, 6e uitgave 2002, VOM-Nieuwegein
- Kruijers, J.P.: *Dunne deklagen*, FME-CWM 2005, TI.05.23
- Ros, D., P.P.J. Ramaekers: *Toepassing van Thermisch Gespoten Aluminiumlagen*, Publicatie CT-project, TI.05-25, September 2005
- Torre, D. van der, H. de Vries: *Oppervlaktebewerking met de laser, Cladden, legeren en dispergeren*, FME/CWM ti.00.11, oktober 2000
- Tucker, R.C.: *Considerations in the Selection of coatings*, Advanced Materials & Processes, March 2004 pp 25-28
- Internet site van NEN: www2.nen.nl
- Internet site van ITSA: <http://www.thermalspray.org/>
- Internet site van Shockwave Metalworking Technologies BV: www.smt-holland.com
- Internet site van TNO-defensie:
http://www.tno.nl/defensie_en_veiligheid/defensiekennis_en_civiele/
- Internet site van corrosion doctors: <http://www.corrosion-doctors.org/>
- Internet site van FME/CWM over lasrook: <http://www.lasrook-Online.nl>
- Internet site FNV Bureau Beroepsziekten: <http://www.bbzfnn.nl/>
- Internet site Maasdijkmetaaltechnieken nv: <http://www.maasdijkmetaal.nl/>
- Internet site CT-project: <http://www.coating-online.nl/>
- ASM Handbook: *Volume 5, Surface Engineering*, 1992
- ASM Handbook: *Volume 11, Failure analysis and prevention*, 1992
- ASM Handbook: *Volume 13, Corrosion*, 1992
- FME-CWM: *Hoogvermogen lasers voor het bewerken van metalen*, VM121, Vereniging FME-CWM februari 2002

Bijlage A Selectietabellen, Toelichting

De in deze keuzematrixen gevolgde methodiek geeft slechts een kwalitatieve indicatie voor de bruikbaarheid van verschillende deklaagtechnieken en materialen in relatie tot de gewenste functionaliteit van de deklaag. Daarbij worden de aspecten die in verband staan met ontwerp in acht genomen. Deze keuzematrixen moeten daarom ook in samenhang met elkaar beschouwd worden. De keuzematrixen staan niet op zich maar vormen een geheel met de 5 publicaties, Dunne deklagen (TI.05-23), Dikke deklagen (TI.05.24), Thermisch gespoten aluminiumlagen (TI.05.25), Coaten van producten uit dunne plaat (TI.05.26) en Kwaliteitsborging van (harde) deklagen (TI.05.27). Deze publicaties zijn gratis te downloaden van de website: www.coating-online.nl.

Het doel van deze keuzematrixen is de gebruiker een eerste indicatie te geven van mogelijke deklaagtechnieken en deklaagtypen die in aanmerking komen aan zijn functionele eisen te voldoen. Daarbij wordt tevens een inzicht gegeven in de ontwerpaspecten waarmee per deklaagtechniek en/of deklaagtype rekening gehouden moet worden. Voor de uiteindelijke keuze zal de gebruiker van deze keuzematrixen altijd een expert op de betreffende deklaagtechniek(en) moeten raadplegen.

De behandelde deklaagtechnieken blijven beperkt tot de technieken die in het project Nieuwe deklaagtechnieken voor het MKB worden behandeld en strekt zich nadrukkelijk NIET uit tot het hele gebied van de oppervlaktetechnologie

Functionaliteit deklaagtechniek	vs	In deze matrix staat op een kwalitatieve wijze aangegeven welke deklaagtechniek toepasbaar is voor het verkrijgen van de gewenste functionaliteit. Deze functionaliteit moet gezien worden in relatie tot het materiaal gekozen voor de deklaag en de mogelijkheid van de deklaagtechniek deze laag succesvol aan te brengen.
Ontwerpaspecten deklaagtechniek	vs	Afhankelijk van de deklaagtechniek worden beperkingen opgelegd waarmee in het ontwerp rekening gehouden moet worden. Dit kan ertoe leiden dat een bepaalde deklaagtechniek niet ingezet kan worden of dat het ontwerp herzien moet worden. Aan de hand van deze matrix kunnen deze ontwerpaspecten in een vroegtijdig stadium worden onderkent.
Functionaliteit vs deklaagtype		Naast de toegepaste deklaagtechniek, bepaald het type deklaag, het materiaal, voor een groot deel de functionaliteit van een deklaag. Afhankelijk van de gebruikscondities zal voor corrosiebescherming of bescherming tegen slijtage een bepaald materiaal gekozen moeten worden. Aan de hand van deze matrix kan een eerste inzicht in toe te passen materialen verkregen worden. De hoeveelheid aan materialen is echter zo groot en groeit elke dag, dat deze matrix nooit volledig kan zijn. Voor de definitieve keuze zal daarom altijd een beroep op de betreffende expert gedaan moeten worden

Deklaagtype deklaagtechniek	vs Niet elk deklaagtype/materiaal kan met elke deklaagtechniek worden aangebracht. Deze matrix geeft inzicht in met welke deklaagtechniek welke materialen kunnen worden aangebracht
Overige aspecten	Aspecten die niet in de eerder behandelde matrixen ondergebracht konden worden maar die wel een rol spelen zijn hier ondergebracht.

Toelichting op de gebruikte kwantitatieve waardering

In de tabellen wordt een kwantitatieve indicatieve waardering gegeven met betrekking tot toepasbaarheid. Deze waardering is uitgedrukt in +++ en --. Daarbij is de waardering zo gegeven dat meer +++ staat voor gunstiger of beter toepasbaar en minder ++ of -- voor ongunstiger of niet-toepasbaar. Een '0' geeft aan dat de betreffende combinatie hier over het algemeen geen toepassing vindt.

Bijlage B Selectietabel Functionaliteit

Functionaliteit	Erosie	Abrasie	Oppervlakte vermoeding	Impingement/impact	Adhesief	Fretting	Erosie/corrosie	Kathodische bescherming	Cavitatie	Erosie/corrosie	Spanningscorrosie	Galvanische corrosie	Pitting	Overall corrosie	Zeemilieu-atmosferisch	Landelijk-atmosferisch	Industrieelmilieu-atmosferisch	Hoge temperatuur (algemeen)	Hoge temp gas-corrosie	Zure corrosie	Reparatie	Themische isolatie	Elektrische isolatie	Esthetisch	Vermoeding	Thermisch beïnvloed-bulk	Thermisch beïnvloed-lokaal	Stootbelasting
Thermisch spuiten																												
Autogeen draadspuiten	+	+	+	+	+	+	+	++	+	-	0	++	-	+	++	+++	+	-	-	-	+++	+	+	+	-	+++	+++	-
Electrisch draadspuiten	+	+	+	+	+	+	+	++	+	-	0	++	-	+	++	+++	+	-	-	-	+++	+	+	+	-	++	+++	-
Atmosferisch plasma spuiten (APS)	+	+	-	-	++	++	+	+	-	+	0	+	+	++	+	++	+	+++	+++	+++	++	+++	+++	+	-	+	+++	-
Hoge Snelheids APS	+	+	-	-	+	+	+	-	-	+	0	+	+	++	+	++	+	+++	+++	+++	++	+++	+++	+	-	+	+++	-
HE-Plasma	+	+	-	-	+	+	+	-	-	-	0	+	+	++	+	++	+	+++	+++	+++	++	++	++	+	-	+	+++	+
Vacuum plasma spuiten (VPS)	+	+	-	-	++	++	++	+	-	-	0	+	+++	+++	+	++	+	+++	+++	+++	++	+++	+++	+	-	+	+++	+
High Velocity Oxygen Fuel (HVOF)	++	++	-	+	+	+	+	++	++	++	0	+	++	+++	+++	+++	++	++	++	++	+++	+	+	+	-	++	+++	+
High Pressure HVOF	+++	+++	-	+	+	+	+++	+	++	+++	0	+	++	+++	+++	+++	++	++	++	++	+++	-	-	+	+	+++	+++	+
High Velocity Air Fuel (HVOF)-Poeder	+++	+++	-	+	+	+	+++	-	++	+++	0	-	++	+++	+++	+++	++	++	++	++	+++	-	-	+	-	+++	+++	+
High Velocity Air Fuel (HVOF)-Draad	+++	+++	-	+	+	+	+++	-	++	+++	0	-	++	+++	+++	+++	++	++	++	++	+++	-	-	+	-	+++	+++	+
Detonation Gun (DG)	+++	+++	-	+	++	++	++	-	++	++	0	-	+++	+++	+++	+++	++	+	+	+	+	-	-	+	+	+++	+++	+
Cold spray	--	--	-	+	++	++	++	++	++	++	0	++	+++	+++	+++	+++	++	+	+	+	+	-	-	+	+	+++	+++	+
fusen of insmelten	+++	+++	++	++	++	++	++	++	++	+++	0	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	--	--	+	+	--	--	++
Oplassen																												
Autogeen	-	+	-	-	-	-	+	0	-	+	-	-	-	-	-	-	-	+	+	-	+++	-	-	-	-	-	-	+
Electrode (SMAW)	++	++	++	++	++	++	++	0	++	++	++	-	++	++	++	++	++	++	++	++	++	-	-	++	++	+/-	+/-	++
TIG (GTAW)	+	+	+	+	+	+	++	0	+	++	+	-	+	++	+	+	+	++	++	+	+++	-	-	+++	++	+/-	+/-	++
GMAW	++	++	+	+	++	++	++	0	++	++	++	-	++	++	++	++	++	++	++	++	++	-	-	++	++	+/-	+/-	++
Onder poederdeklassen (OP)	++	++	+	+	+	+	++	0	++	++	++	-	+	++	++	++	++	++	++	++	+	-	-	++	++	-	-	++
Plasma Transferred Arc (PTA)	+	+	+	+	+	+	++	0	+	++	+	-	+	++	+	+	+	++	++	+	+++	-	-	+++	++	-	-	++
Elektroslak lassen met band	+++	+++	+	+	+++	+++	+++	0	++	++	+	-	++	++	++	++	++	++	++	++	+	-	-	+	+	-	-	++
Plasma Poeder booglassen (PPAW)	+++	+++	+	+	+++	+++	+++	0	++	++	+	-	++	++	++	+	+	+	++	+	++	-	-	+++	++	+	+	++
Lasercladden																												
CO2 laser	+++	+++	++	++	+++	+++	+++	0	++	++	0	0	0	++	0	0	0	0	0	0	+++	-	-	-	+	+++	++	+++
Solid state laser (bv Nb:YAG)	+++	+++	++	++	+++	+++	+++	0	++	++	0	0	0	++	0	0	0	0	0	0	+++	-	-	-	+	+++	++	+++
High Power Diode Laser (HPDL)	+++	+++	++	++	+++	+++	+++	0	++	++	0	0	0	++	0	0	0	0	0	0	+++	-	-	-	+	+++	++	+++
Explosief cladden	++	++	0	++	0	++	++	++	++	++	0	0	0	0	+	+	++	--	-	+++	-	-	-	-	-	+++	++	+++
CVD	++	+++	-	--	++	++	++	--	--	++	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	--	++	--	+++	-	-	-	-
PVD	++	+++	-	--	++	+++	++	--	--	++	-	-	+	++	++	++	++	+	++	+	--	++	--	+++	-	-	-	+
Elektrolytisch deklaagprocessen	+	++	--	--	++	++	+	+++	+	+	-	++	+++	+++	++	++	++	+	+	++	+	--	--	++	-	+++	+++	+
Thermische coating processen	Thermische coatingsprocessen worden over het algemeen niet ingezet bij							+++	-	-	-	+	-	++	++	+++	++	-	-	--	--	--	--	-	--	+	+	+
Verzinken	slijtagetoepassingen							+++	-	-	-	++	-	++	+++	+++	+++	+	+	--	--	--	--	+	--	-	-	+
Aluminiseren																												
Stroomloze processen	+	++	-	--	++	++	++	+++	-	++	-	++	+++	+++	+++	+++	+++	+	+	++	+	--	--	+++	-	+++	+++	+

Bijlage C Selectietabel ontwerpaspecten

Ontwerpaspecten																										
	Overgangen-afrodings	Inwendig toepasbaar	Vervormbaar na aanbrengen	Nabewerken	Vorbewerken	Flexibiliteit/inzetbaarheid	Effect op constructie-vermindering sterkte?	Elastisch toelaatbare rekken	Effect geometrie/maatnauwkeurigheid	Thermische belasting tijdens applicatie	Opmenging met basismateriaal	Vormvastheid	Lange termijn eigenschappen	Assemblage	Mogelijke laagdikten (mm)	Restspanningen	Statische bedrijfsbelasting	Dynamische bedrijfsbelasting	Wisselenden bedrijfsbelasting	Verbindingen	Compatibiliteit met andere materialen	Stromende vloeistoffen	Max. bedrijfstemperatuur	Hechting	Reiniging	Reparatie
Thermisch spuiten																										
Autogeen draadspuiten	-	+	-	+	+	++	++	-	++	+++	+++	++	+	+	<10	+++	++	++	-	-	++		++	+	-	+
Electrisch draadspuiten	-	+	-	+	+	++	++	-	++	+++	+++	++	+	+	<10	+++	++	++	-	-	++		++	+	-	+
Atmosferisch plasma spuiten (APS)	-	++	-	+	+	++	++	-	++	+++	+++	++	++	+	<0,5	+++	++	++	-	-	++		++	++	-	+
Hoge Snelheids APS	-	+	-	+	+	+++	++	-	++	+++	+++	++	++	+	<0,5	+++	++	++	-	-	++		++	++	-	+
HE-Plasma	-	-	-	+	+	+	+++	-	++	+++	+++	++	++	+	<0,5	+++			-	-	++		++	++	-	+
Vacuum plasma spuiten (VPS)	-	-	-	+	+	+	+++	-	++	+++	+++	++	+++	+	<0,5	+++			-	-	++		++	++	-	+
High Velocity Oxygen Fuel (HVOF)	-	-/+	-	+	+	+	+++	-	+	+++	+++	++	+++	+	<0,5	+++	++	++	+	-	++		++	++	-	+
High Pressure HVOF	-	-/+	-	+	+	+	+++	-	+	+++	+++	++	+++	+	<0,5	+++	++	++	+	-	++		++	++	-	+
High Velocity Air Fuel (HVOF)-Poeder	-	+	-	+	+	+	+++	-	++	+++	+++	++	+++	+	<0,5	+++	++	++	+	-	++		++	++	-	+
High Velocity Air Fuel (HVOF)-Draad	-	+	-	+	+	+	+++	-	+	+++	+++	++	+++	+	<0,5	+++	++	++	+	-	++		++	++	-	+
Detonation Gun (DG)	-	--	-	+	+	-	+++	-	+	+++	+++	++	+++	+	<0,5	+++	++	++	+	-	++		++	++	-	+
Cold spray	-	--	-	+	+	-	+++	-	+	+++	+++	++	+++	+	<0,5	+++	+++	+++	++	-	++		++	++	-	+
fusen of insmelten	-	+	++	+	+	+	-	++	-	-	+++	-	+++	-	<5	+++	+++	+++	++	-	++		++	+++	-	+
Oplassen																										
Autogeen	+	+	+/-	++	+	+	+	+	+	-	-	+	+	++	1-3	-	+++	++	+++	+			++	++		++
Electrode (SMAW)	++	+/-	++	++	+	++	+	+	+	-	-	+	++	++	2-4	-	+++	+++	+++	+++			++	+++		++
TIG (GTAW)	+++	+	++	+	+	++	-	++	-	-	--	-	++	++	2-3	--	+++	+++	+++	+++			++	+++		++
GMAW	++	+/-	++	++	+	++	+	++	+	+/-	++	-	++	++	2-5	-	+++	+++	+++	+++			++	+++		++
Onder poederdeklassen (OP)	++	+/-	++	+	+	+	++	-	-	--	++	-	++	++	3-10	+	+++	+++	+++	+++			++	+++		-
Plasma Transferred Arc (PTA)	++	+	++	+	+	++	+	++	+	+	+	+	++	++	1-3	+	+++	+++	+++	+++			++	+++		+
Elektroslak lassen met band	++	+/-	++	+	+	+	++	-	-	--	+	-	++	++	3-8	++	+++	+++	+++	+/-			++	+++		-
Plasma Poeder booglassen (PPAW)	+++	+	++	+	+	++	+	++	+	+	+	+	++	++	1-3	+	+++	++	+++	++			++	+++		+
Lasercladden																										
CO2 laser																										+
Solid state laser (bv Nb:YAG)																										+
High Power Diode Laser (HPDL)	+++	+++	+	+	+	+++	+++	++	++	++	++	+++	+++	++	0,1-2	++	+++	+++	+++	+	++	++	+++	+++	+	+++
Explosief cladden		-	++	+++	+	++	+	++	--	+++	+++	-	+	+++	0,01-10	-	+++	+++	+++		++	+	-	+++		-
CVD		+	+++	+	+++	+++	+	-	+++	+++	-	+++	+	++	0,004-0,020	+	++	-	-	++	+++		++	+++	+++	--
PVD		+++	-	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+	+	++	0,005-0,030	++	++	-	-	++	+++		++	+++	+++	--
Elektrolytisch deklaagprocessen		-	+	+++	+++	+++	+	+++	+	++	+++	+++	++	++	0,01-0,1	+++	++	++	++	-	+	+	+	++	+++	++
Thermische coating processen																										
Verzinken	++	+++	+	+++	+++	+++	+	++	++	++	++	++	++	++	0,01-0,15	++	++	++	++	-	+	+	+	+++	+++	+
Aluminiseren	++	+++	+	+++	+++	+++	-	++	+	-	+	+	+++	++	0,01-0,15	++	++	++	++	-	+	+	+	+++	+++	+
Stroomloze processen		+++	+++	+++	+++	+++	+++	+	++	+++	+++	+++	+	++	0,002-0,050	+++	++	+	+	-	+	+	+	+	+++	+

Bijlage D Selectietabel coatingtype tegen functionaliteit

Beoogde functionaliteit	Erosie	Abrasie	Oppervlakte vermoeding	Impingement/impact	Adhesief	Fretting	Erosie/corrosie	Kathodische bescherming	Cavitate	Erosie/corrosie	Spanningscorrosie	Galvanische corrosie	Pitting	Overall corrosie	Zee milieu-atmosferisch	Landelijk-atmosferisch	Industrieel milieu-atmosferisch	Hoge temperatuur (algemeen)	Hoge temp gas-corrosie	Zure corrosie	Reparatie	Thermische isolatie	Elektrische isolatie	Esthetisch	Vermoeling	Thermisch beïnvloed-bulk	Thermisch beïnvloed-lokaal
Aangebrachte deklaag																											
Aluminium brons					X	X			X												X			X			
Aluminium & Aluminiumlegeringen								X											X		X			X			
Babbitt					X														X		X						
Tin					X																X						
Mo/Ni-Cr-B-Si			X		X	X																					
Molybdeen			X		X	X																					
Hoog-koolstof staal					X																X						
Alumina/titania					X																	X	X				
Wolframcarbide-Co	X	X			X																X						
Wolframcarbide-CoCr	X	X			X									X	X	X	X				X						
Co-Mo-Cr-Si				X	X	X			X												X						
Fe-Mo-C					X																X						
Aluminium oxide (alumina)		X		X																		X	X				
(Hard) Chroom		X																						X			
Chroom-oxide	X	X																									
Chroom-carbide	X	X			X	X							X	X	X	X	X	X	X	X		X					
Ni-Cr-B-SiC/WC-fused					X																X						
Ni-Cr-B-SiC-fused					X					X											X						
Ni-Cr-B-SiC-unfused			X							X											X						
Cu-Ni-In						X																					
Cu-Ni						X			X																		
Co-Mo-Cr-Si					X																						
Co-Cr-Ni-W									X										X		X						
WC/Ni-Cr-B-SiC fused	X																				X						
WC/Ni-Cr-B-SiC unfused	X																				X						
Ni-Cr-B-SiC-Al-Mo									X												X						
Ni-Al/Ni-Cr-B-SiC									X																		
AISI304, 316 type									X												X						
AISI420																					X						
Nikkel en nikkelbasis (bv inc625, alloy 59)															X	X	X	X	X		X						
Ni-Ti									X																		
Zink								X																X			
Zink-5% Aluminium								X																X			
ZrO2-Y2O3 (TBC)																						X	X				
TiN		X			X	X							X	X	X	X	X	X	X	X	X			X			
TiC		X			X	X							X	X	X	X	X	X	X	X	X			X			
TiCN		X			X	X							X	X	X	X	X	X	X	X	X			X			
CrxCy		X			X	X							X	X	X	X	X	X	X	X	X			X			
TiAlN		X			X	X							X	X	X	X	X	X	X	X	X			X			
CrN		X			X	X							X	X	X	X	X	X	X	X	X			X			
MoST		X			X	X							X	X	X	X	X	X	X	X	X			X			
Me-C		X			X	X							X	X	X	X	X	X	X	X	X			X			
W-C:H		X			X	X							X	X	X	X	X	X	X	X	X			X			
Ni																				X					X		
AlCrN		X			X	X							X	X	X	X	X	X	X	X	X			X			
C (DIAMANT)		X			X	X							X									X					
WC/C		X			X	X							X	X	X	X	X			X			X				
DLC (Diamond Like Coating)		X			X	X							X	X	X	X	X			X			X				

Bijlage E Selectietabel coatingtype tegen aanbrengtechniek

Materiaaltype vs proces	Aluminium brons	Aluminium & Aluminiumlegering	Babbitt	Tin	Mo/Ni-Cr-B-Si	Molybdeen	Hoog-koolstof staal	Alumina/titania	Wolframcarbide-Co	Wolframcarbide-CoCr	Co-Mo-Cr-Si	Fe-Mo-C	Aluminium oxide (alumina)	(Hard) Chroom	Chroom-oxide	Chroom-carbide	Ni-Cr-B-SiC/WC-fused	Ni-Cr-B-SiC-fused	Ni-Cr-B-SiC-unfused	Cu-Ni-In	Cu-Ni	Co-Mo-Cr-Si	Co-Cr-Ni-W	WC/Ni-Cr-B-SiC fused	WC/Ni-Cr-B-SiC unfused	Ni-Cr-B-SiC-Al-Mo	Ni-Al/Ni-Cr-B-SiC
Thermisch spuiten																											
Autogeen draadspuiten		X	X	X	X		X	X																			X
Electrisch draadspuiten		X	X	X		X	X																				X
Atmosferisch plasma spuiten (APS)					X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
Hoge Snelheids APS					X	X	X		X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X
HE-Plasma					X	X	X		X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X
Vacuum plasma spuiten (VPS)					X	X	X		X	X	X	X									X					X	X
High Velocity Oxygen Fuel (HVOF)									X	X	X		X		X		X	X	X	X	X			X	X	X	X
High Pressure HVOF									X	X	X						X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
High Velocity Air Fuel (HVOF)-Poeder									X	X	X						X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
High Velocity Air Fuel (HVOF)-Draad									X	X	X						X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
Detonation Gun (DG)																											X
Cold spray	X	X	X	X					X	X	X						X	X			X	X				X	
fusen of insmelten					X				X	X	X						X	X					X				
Oplassen																											
Autogeen							X		X	X																	
Electrode (SMAW)	X						X		X	X		X									X						
TIG (GTAW)	X						X		X	X		X									X						
GMAW	X						X		X	X		X									X						
Onder poederdeklassen (OP)	X						X				X										X						
Plasma Transferred Arc (PTA)	X						X				X										X						
Elektroslak lassen met band	X						X				X										X						
Plasma Poeder booglassen (PPAW)	X						X		X	X	X					X					X						
Lasercladden																											
CO2 laser	X	X	X				X		X	X	X	X				X	X	X	X	X	X		X	X	X		X
Solid state laser (bv Nb:YAG)	X	X	X				X		X	X	X	X				X	X	X	X	X	X		X	X	X		X
High Power Diode Laser (HPDL)	X	X	X				X		X	X	X	X				X	X	X	X	X	X		X	X	X		X
Explosief cladden	X	X		X	X	X	X					X									X	X		X			
CVD													X														
PVD													X		X	X											
Elektrolytisch deklaagprocessen	X	X	X	X	X	X					X	X		X						X	X	X	X				
Thermische coating processen		X																									
Verzinken																											
Aluminiseren																											
Stroomloze processen	X	X	X	X	X						X	X								X	X						

Bijlage F Selectietabel overige aspecten

Proces/techniek	Kosten (vergelijkenderwijs)			Milieubelasting/Arbo tijdens aanbrengen van de deklaag				
Overige aspecten	Aanschaf apparatuur	Onderhoudskosten		Cr VI	Ni	Geluid	Stof	Zn
Thermisch spuiten								
Autogeen draadspuiten	++	++		+	+	+	++	+
Electrisch draadspuiten	+++	+++		+	+	+	+	+
Atmosferisch plasma spuiten (APS)	+	+		++	++	-	+	nvt
Hoge Snelheids APS	+	+		++	++	-	+	nvt
HE-Plasma	+	++		++	++	-	+	nvt
Vacuum plasma spuiten (VPS)	-	-		-	-	++	+++	nvt
High Velocity Oxygen Fuel (HVOF)	+	+		+	+	-	+	nvt
High Pressure HVOF	+	+		+	+	--	+	nvt
High Velocity Air Fuel (HVOF)-Poeder	+	+		+	+	-	+++	nvt
High Velocity Air Fuel (HVOF)-Draad	+	+		+	+	-	+++	nvt
Detonation Gun (DG)	--	--		-	-	--	+	nvt
Cold spray	-	-		-	-	-	+	+
fusen of insmelten	-	-		++	++	++	++	nvt
Oplassen								
Autogeen	++	-				+	+	nvt
Electrode (SMAW)	+++	-		--		+	+	nvt
TIG (GTAW)	+	+				+	+	nvt
GMAW	+	-		--		-	+	nvt
Onder poederdeklassen (OP)	-	+				-	-	nvt
Plasma Transferred Arc (PTA)	-	-		-		++	+	nvt
Elektroslak lassen met band	--	+			-	++	-	nvt
Plasma Poeder booglassen (PPAW)	-	-		-	--	-	+	nvt
Lasercladden								
CO2 laser	++	++		+	+	+++	+	nvt
Solid state laser (bv Nb:YAG)	+	+		+	+	+++	+	nvt
High Power Diode Laser (HPDL)	-	-		+	+	+++	+	nvt
Explosief cladden	+	+		nvt	nvt	-	++	nvt
CVD	++	++		+++	+++	+++	+++	nvt
PVD	+	+		+++	+++	+++	+++	nvt
Elektrolytisch deklaagprocessen	+	+++		--	--	+++	+++	+
Thermische coating processen								
Verzinken	+	++		nvt	nvt	+++	++	++
Aluminiseren	+	++		nvt	nvt	+++	++	++
Stroomloze processen	++	++		+	+	+++	+++	+