

Dunne deklagen

met name via PVD en CVD voor onder meer gereedschappen

Deze publicatie is gemaakt om een overzicht te geven van de mogelijkheden en onmogelijkheden van het toepassen van dunne deklagen ($< 10 \mu\text{m}$) op producten. De nadruk wordt gelegd op PVD- en CVD-lagen en hun mechanische eigenschappen. Naast deze publicatie verschijnen in het kader van het project "Nieuwe coatingtechnieken voor het MKB" nog vier andere publicaties die gezamenlijk een, zij het niet volledig, beeld geven van coating-technologie in het algemeen en de vele aspecten die daarmee samenhangen. De andere vier publicaties (te downloaden via <http://www.coating-online.nl>) zijn: TI.05.24 "Dikke deklagen", TI.05.25 "Thermisch gespoten aluminiumlagen", TI.05.26 "Coaten van producten uit dunne plaat" en TI.05.27 "Kwaliteitsborging van (harde) deklagen".

Inhoud

1	Inleiding	1
2	Conventionele dunne deklagen	2
2.1	Algemene voorbeelden	2
2.2	Soorten coatings	5
3	Procesomschrijvingen	6
4	Ontwerpaspecten	7
4.1	Basismateriaal	7
4.2	Geometrische aspecten	8
4.3	(Voor)behandeling	8
4.4	Transportrichtlijnen	8
4.5	Coatingaspecten tijdens het ontwerpen	8
4.6	Praktijkvoorbeeld	10
5	Testen en beproeven van dunne lagen	10
5.1	Tribologische beproevingen	10
5.2	Overige beproevingsmethoden	11
6	Kosten	11
7	Toepassingen	12
8	Normen	13
9	Toekomstige ontwikkelingen	13
	Referenties en bronvermelding	14
	Bijlagen	15

1 Inleiding

In deze inleiding wordt een overzicht gegeven van verschillende typen dunne deklagen (dat zijn lagen met een laagdikte tot $10 \mu\text{m}$). Verder wordt aangegeven wanneer het zinvol is om een dunne laag aan te brengen en welke overwegingen daarbij een rol (moeten) spelen. Dunne lagen worden om uiteenlopende redenen aangebracht op voorwerpen. De meest voorkomende aanleidingen zijn: het verhogen van het esthetische aanzien van een voorwerp (bijvoorbeeld een goudkleurige titaannitridelaag op een horloge), het verhogen van de slijtvastheid van een voorwerp (bijvoorbeeld een chroomnitridelaag op een verspanend gereedschap), het verbeteren van het wrijvingsgedrag/lossingsgedrag (bijvoorbeeld een koolstofhoudende laag op matrijzen, zie figuur 1) en het verbeteren van de corrosievastheid van voorwerpen (bijvoorbeeld een chroomcarbide laag op onderdelen van witgoed). Vaak worden meerdere eigenschappen van een dunne laag gecombineerd, zoals het esthetisch aanzien, de slijtvastheid en zelfs corrosievastheid van een dunne coating op een horloge of bril (zie figuur 2).



figuur 1 Matrijzen voor CD's en DVD's

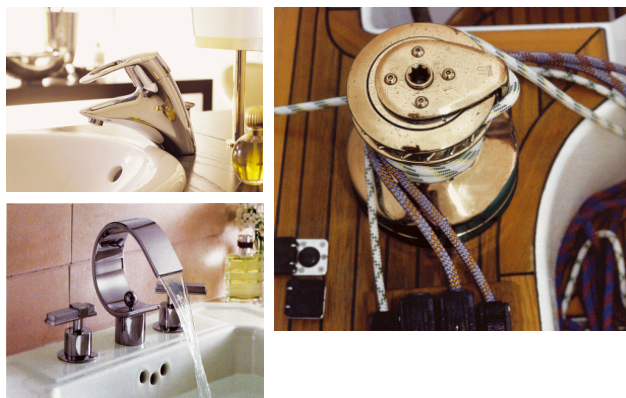


figuur 2 PVD coating op het montuur van een bril

Dikkere deklagen (deklagen die dikker zijn dan $10 \mu\text{m}$) worden vooral toegepast indien voldoende capaciteit (laagdikte) wordt verlangd van een coating om de slijtvastheid en corrosiebestendigheid gedurende de levensduur van een component te waarborgen. Hiervoor wordt verwezen naar de publicatie over dikke deklagen (TI.05.25). Constructeurs en ontwerpers van gereedschappen en componenten worden voortdurend uitgedaagd om de levensduur en standtijd van hun producten te verlengen. Bovendien wordt van veel gereedschappen geëist dat de onderhouds- en reinigingsintervallen worden verlengd en dat bij voorkeur koel- en smeermiddelen overbodig zijn. Deze eisen aan de gereedschappen maken het van groot belang dat het complete systeem goed in het oog wordt gehouden, dus het gereedschap inclusief zijn omgeving. Daarnaast is vanzelfsprekend de toepassing van het gereedschap van buitengewoon belang: wordt gereedschap bijvoorbeeld blootgesteld aan een stotende belasting of glijdt het plaatselijk langs een ander materiaal?

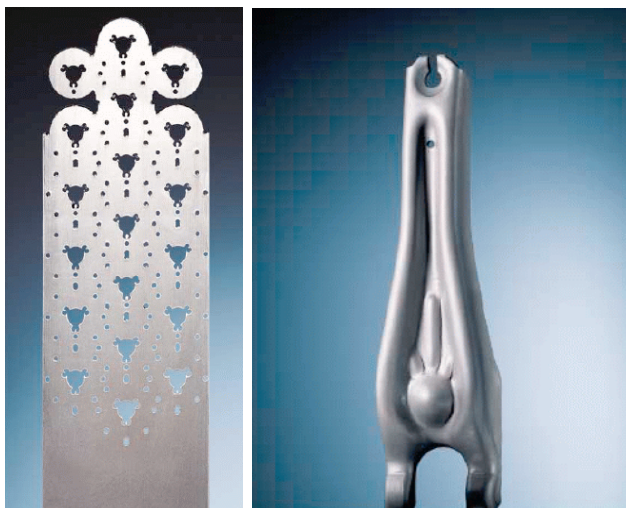
Eén van de methodes om de levensduur van een product te verlengen, is het aanbrengen van een coating op het product (zie figuur 3 voor een aantal toepassingen). Voordat wordt overwogen om een coating aan te brengen, ongeacht of deze dik of dun is, moet bekend zijn om welk product het gaat. Hiermee wordt bedoeld dat een constructeur moet weten welke eisen en specificaties aan een product worden gesteld. De eisen die bijvoorbeeld aan een zaagblad worden gesteld, zijn volledig verschillend van de eisen die aan een matrijs voor kunststofproducten worden gesteld. Dit betekent dat de selectie al begint met de keuze van het basismateriaal (substraat). Welke eigenschappen van het basismateriaal zijn nodig om te kunnen voldoen aan de eisen die worden gesteld aan het product? Bestaan er materialen die voldoen aan deze eisen of moet gebruik worden gemaakt van een coating? Hierbij speelt ook het kostenaspect mee: mogelijk is er een basismateriaal dat voldoet aan de specificaties die worden gesteld aan het te maken product, maar is het toepassen van een geschikte coating op een minder geschikt basismateriaal goedkoper. Een ander zeer belangrijk aspect bij het kiezen van een

coating is de manier van aanbrengen. De eigenschappen van een coating zijn voor een belangrijk deel afhankelijk van de manier van aanbrengen.



figuur 3 Toepassing van PVD deklagen op sanitair en een lier

Het is daarom essentieel dat monsters of prototypes die tijdens de beginfase worden gemaakt om de eigenschappen van het product (het gereedschap) te bepalen, op representatieve wijze worden gemaakt, zodat deze goed te reproduceren zijn in de praktijk (zie figuur 4).



figuur 4 Voorbeelden van producten die met behulp van stans- en omvormgereedschap worden vervaardigd

Kortom, het is van groot belang dat constructeurs, productontwikkelaars en coatingbedrijven in een vroeg stadium worden betrokken bij de ontwikkeling van een product. De functionele eisen die worden gesteld aan het product zijn dan bij de constructeur, de productontwikkelaar en het coatingbedrijf bekend en het toepassen van een coating als laatste redmiddel wordt voorkomen. Dit laatste pakt namelijk in de praktijk vaak verkeerd uit. Een coating bepaalt in grote mate de haalbare prestaties van een product, de **kwaliteit** van een coating is echter het resultaat van alle bewerkingsstappen aan het product. De levensduur van het product is in de meeste gevallen afhankelijk van de kwaliteit van de coating.

Er zijn vele typen dunne lagen die kunnen worden toegepast op producten. In deze publicatie wordt de nadruk gelegd op dunne deklagen die al commercieel verkrijgbaar zijn. Dunne lagen die nog in het stadium van ontwikkeling verkeren, worden kort besproken.

Er zijn al zeer veel verschillende commercieel verkrijgbare dunne harde coatings, waarvan een groot deel nog nauwelijks of niet bekend is, zoals vele typen koolstofhoudende coatings. De bedoeling van deze publicatie is om een overzicht te geven van de meest voorkomende dunne harde deklagen en antwoorden te geven op praktische vragen met betrekking tot de toepassing van deze coatings.

Kwaliteit en kwaliteitsborging, vanzelfsprekend belangrijke aspecten bij het aanbrengen van harde dunne coatings op producten, worden in de aparte publicatie "*Kwaliteitsborging bij het toepassen van (harde) deklagen*" (TI.05.28) behandeld.

De nadruk in deze publicatie ligt op het aanbrengen van dunne deklagen via PVD (*physical vapour deposition*) of CVD (*chemical vapour deposition*), maar er bestaan meer technieken om dunne lagen aan te brengen. In tabel 1 wordt een overzicht gegeven van processen en oppervlaktetechnieken die hiervoor gebruikt kunnen worden. Deze tabel beoogt niet volledig te zijn, maar slechts een idee te geven van mogelijke technieken ingedeeld aan de hand van de behandelingsmethode en een maximale laagdikte van 10 μm .

tabel 1 Overzicht van processen en oppervlaktetechnieken voor het aanbrengen van dunne lagen

Proces	Oppervlaktetechniek
vanuit gasfase of plasma-opdampen	► PVD-proces ► CVD-proces ► ionenimplantatie
galvanisch/natchemisch	► technisch verchromen ► stroomloos vernikkelen ► stroomloos vernikkelen-PTFE ► hardanodiseren
thermochemisch	► carboneren/carbonitreren ► nitreren/nitrocarboneren ► nitrotec/QPQ ► boren ► kolsteriseren ► pakchromeren
thermisch/mechanisch *)	► thermisch spuiten ► walsplateren/coëxtrusie ► oplassen/lasercladden
mechanisch *)	► micropenen ► shotpeenen ► drukrollen ► drukpolijsten
thermisch *)	► laserharden ► inductieharden ► impulsharden ► vlamharden
*) Deze lagen zijn vaak dikker dan 10 μm Bron: www.tribologie.nl	

2 Conventionele dunne deklagen

2.1 Algemene voorbeelden

In dit hoofdstuk worden de meest gangbare dunne harde coatings die via PVD of CVD worden aangebracht, besproken. In de tabellen 2 en 3 staan gegevens over PVD en CVD coatings die moeten worden beschouwd als een gemiddelde. Uit de praktijk is vaak gebleken, dat de waarden voor uiteenlopende eigenschappen van de coatings sterk afhankelijk zijn van de manier van aanbrengen. Een voorbeeld hiervan is de hardheid van een coating die afhankelijk is van de dichtheid van de coating. Voor een CrN (chroomnitride) coating is een gemiddelde waarde van 2000 HV (19,6 GPa; GPa = gigapascal, giga = 10^9 , Pascal = N/m^2) gegeven, maar er zijn CrN coatings gemaakt die een hardheid van 3059 HV (30 GPa) hebben; het verschil in hardheid is grotendeels toe te

tabel 2 Eigenschappen en toepassingen van dunne CVD en PVD lagen [1, 2]

Deposietietechniek		CVD					PVD							
Werkstuk	Coating	TiN	TiC	Cr _x C _y	TiC/TiN ¹⁾	TiN	W-C:H	TiCN	TiAlN	TiAlN (ML)	TiN/TiCN/ TiAlN	CrN	MoS ²⁾	Me-C ³⁾
Proces- eigenschappen	Laagdikte (µm)	2-10	2-10	1-10	7-9	1-20	3-5	3-4	3-4	2-3,5	2-3,5	5	1	2-3
	Groei-(opbrengst)snelheid (µm/uur)	0,5-2	0,5-2	0,5-2		1-30	2							
	Procestemperatuur (°C)	850-1000	950-1050	850- 900	950-1000	100-550	100	400-450	400-450	400-450	400-450	200-450	<200	200
	Vervorming werkstuk	mogelijk	mogelijk	mogelijk		gering	gering							
	Hechting aan basismateriaal	goed	goed	goed		goed bij geringe laagdikte	goed							
laageigenschappen	Hardheid (HV) ⁴⁾	2000-2500	3500-4000	2000	3000	1500-2000 (TiN)	1000-1500	3500	3300	3500	3500	2000	zacht	>1500
	Maximale gebruikstemperatuur (°C)	500	400	900	450	350-450	350	400	800	800	800	700	400	<600
	Slijtvastheid	zeer goed	zeer goed	goed		zeer goed	zeer goed							
	Taaitheld	neemt af	neemt af	neemt af		neemt af	neemt af							
	Stootvastheid	slecht	slecht	slecht		slecht	slecht							
	Vermoeingssterkte werkstuk	neemt af	neemt af	neemt af		neemt af	geen invloed							
	Corrosieweerstand	goed	goed	zeer hoog		goed	goed							
	Smeltpunt (°C)	2950	3067	1810		2950 (TiN)	onbekend							
	Wrijvingscoëfficiënt (tegen 100Cr6)	0,5	0,6		0,5	0,6	0,2	0,15	0,7	0,7	0,2	0,25	<0,1	0,1-0,15
	Warmtegeleiding (in vergelijking met staal)	laag	laag		laag	laag	hoog	zeer laag	zeer laag	zeer laag	hoog	laag	hoog	laag
Toepassing	Kleur	goud	grijsmetallisch		goud	goud	antraciet	blauw/grijs	aubergine	aubergine	oud-rose	zilver	zwart/grijs	zwart/grijs
	Chemische bestendigheid	goed	goed	goed	goed									
	Toepassing	beitelplaatjes, halfgeleiders, waferdragers, hoogrendementsglas, biërflessen				verspanend HSS ⁵⁾ gereedschap, omvormgereedschap	bewerken van gehard staal, HSF ⁶⁾ semidroog en droog	bewerken van carbides, cer- mets en HSS; uitstekend ge- uitscheidend ge- schikt voor bo- ren van staal; bewerken van staal onder dro- ge en natte condities	bewerken van koper; metaal- omvormen; matrijzen voor kunststof- verwerking; matrijzen voor gieten van aluminium en magnesium	droog be- werken en omvormen in combi- natie met een harde onderlaag	precisie- droog on- vormen van aluminium; verspanend gereedschap voor alumi- nium, kunst- stof en staal	snijgereed- schap, omvorm- gereed- schap, matrijzen, spuitgiet- onderdelen	omvorm- en diep- trekgereed- schap, omvorm- gereed- schap, matrijzen, spuitgiet- onderdelen	

1) TiC/TiN = gecombineerde TiC en TiN coating.

2) MoST = MoS₂/Ti composiet coating.

3) Me-C = metaalhoudende koolstofcoating.

4) Gemiddelde waarden voor de hardheid, afkomstig uit verschillende metingen aan coatings met verschillende samenstellingen, laagdikten en interne spanningen.

5) HSS = high-strength steel.

6) HSF = hoge-snelheidsfrezen.

N.B. Vele waarden zijn richtlijnen en coatings zijn onderhevig aan veranderingen; om die reden is het noodzakelijk in goed overleg met de jobcoater te besluiten welke coating geschikt is voor welke toepassing. De niet ingevulde vakken geven aan dat de betreffende eigenschap niet bekend is of nog niet is onderzocht.

tabel 3 Enkele karakteristieke coatingparameters van gangbare harde PVD en CVD coatings [16]

	TiN	TiCN	TiC	TiAlN	CrN	Al ₂ O ₃
Productieproces	PVD/CVD	PVD/CVD	CVD	PVD	PVD	CVD/PVD
Oxidatietemperatuur in °C ¹⁾	> 450	> 350	> 350	> 700	> 600	— ²⁾
Thermische barrière effect ³⁾	+++	++	+	++++	+	+++++
Weerstand tegen abrasie	++	+++	+++	+++	++	++
Weerstand tegen adhesieve slijtage (tegen staal)	++	++	+	++	++	+++
Weerstand tegen slijtage als gevolg van diffusie (tegen staal)	++	+	+	+++	++	+++
Bescherming van basismateriaal tegen corrosie ⁴⁾	+	+	+	+	++	+

1) De oxidatietemperatuur is de temperatuur waarbij oxidatie van de coating begint en de eigenschappen van de coating worden verslechterd.
 2) Al₂O₃ is al geoxideerd.
 3) De coatings zijn slechte warmtegeleiders en fungeren als thermische barrière, zodat geen warmte tijdens verspanende metaalbewerking wordt afgevoerd naar het gereedschap.
 4) De coatings zelf coroderen niet en beschermen het onderliggende basismateriaal tegen corrosie. Hoe meer plussen staan vermeld, des te beter het effect, de weerstand en bescherming door de coating.

schrijven aan het verschil in dichtheid. Het is daarom belangrijk de gegevens in de tabellen met bedachtzaamheid te interpreteren, omdat vaak niet alle relevante gegevens (zoals de ware dichtheid van een coating) bekend zijn. Ook in dit geval is het aan te bevelen contact op te nemen met de coatingbedrijven, om na te vragen hoe hard en/of hoe dicht de coatings zijn die zij aanbrengen.

In de tabellen 2 en 3 wordt een groot aantal karakteristieke parameters van verschillende PVD en CVD dekklagen genoemd. Daar waar geen getal of omschrijving in de tabellen is weergegeven, is dit of onbekend of is de onzekerheid zo groot, dat het weinig zinvol is om er een waarde in te vullen.

PVD en CVD lagen hebben een fysische en een chemische binding met het basismateriaal, maar CVD lagen hebben een relatief betere chemische binding met het basismateriaal dan PVD lagen, voornamelijk vanwege de hogere opbrengtemperatuur van CVD lagen. Vanwege de hoge temperatuur waarmee CVD lagen worden aangebracht (hoofdstuk 3, Procesomschrijvingen), moeten stalen basismaterialen na afloop (opnieuw) worden gehard. In de tabellen 2 en 3 zijn geen koolstofhoudende en diamantlagen opgenomen. Eind 2004 is een VDI (*Verein Deutscher Ingenieure*) richtlijn beschikbaar gekomen, waarin de koolstofhoudende en diamantlagen uitvoerig beschreven staan en waarin met name de benaming en onderverdeling van de diverse diamantachtige lagen duidelijk is weergegeven [3]. Bovendien zijn de eigenschappen van deze verschillende lagen vermeld (zie de tabellen 6 en 7 in bijlage I).

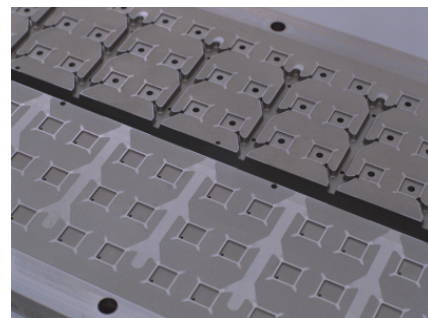
Voorbeelden van twee andere technieken dan PVD en CVD (zie tabel 1) worden vaak toegepast en zullen kort worden beschreven.

Voorbeeld 1

Een variant op het bestaande hardverchromen is het zogenoemde MCP®, oftewel Micro Chrome Plating, wat ook onder een aantal andere namen bekend staat. Kenmerk van deze behandeling is het aanbrengen van een chroomlaag met een dikte tussen de 2 en 10 µm. Hierdoor is het mogelijk om producten van een slijt- en corrosievaste laag te voorzien, die tevens de lossingseigenschappen sterk verbetert. Een veel voorkomende toepassing is het aanbrengen van een dergelijke laag op zogenoemde *chipmoulds*, oftewel matrijzen die het inkapselen van een drager met chip in kunststof verzorgen (zie figuur 5). De toegepaste kunststoffen zijn sterk abrasief en hebben een behoorlijke neiging te kleven in de matrijs, wat weer tot productie-uitval en kwaliteitsverlies kan leiden.

Voorbeeld 2

QPQ of Nitrotec; dit zijn processen waarbij op verschillende wijze een stikstof/koolstof verrijkte zone wordt gevormd met een aansluitende oxidatiebehandeling.



figuur 5 Inkapselmatrijs voor de halfgeleiderindustrie

Deze zone bevindt zich deels in het basismateriaal en deels erop. Het grote voordeel van deze laag is de toename van de vermoeiingsweerstand door de toegenomen drukspanning in het basismateriaal en de uitstekende slijtage- en corrosieweerstand. Hierdoor kan de constructeur relatief goedkoop uitgangsmateriaal kiezen en toch de gewenste eigenschappen verkrijgen door deze aanvullende behandeling. Tevens krijgen de producten een aantrekkelijk zwart uiterlijk. Typisch toepassingen vindt men in de automobiellindustrie en bij massafabricageproducten (figuren 6 en 7).



figuur 6 Gasdemper met zuigerstang voorzien van QPQ-laag



figuur 7 Metalen dynamocomponenten voorzien van Nitroteclaag

Voorgaande voorbeelden zijn gekozen, omdat deze behandelingen relatief vaak of op grote schaal worden toegepast. Hiermee is niet gezegd dat de andere processen weinig voorkomen of niet interessant zijn voor toepassing in de industrie. Het valt in dit geval echter buiten het bestek van deze publicatie om alle mogelijke behandelingen met hun varianten te beschrijven.

2.2 Soorten coatings

Hieronder volgen beschrijvingen van verschillende coatings, die niet in de tabellen konden worden opgenomen. Veel van deze coatings worden toegepast op producten en gereedschappen die aan slijtage onderhevig zijn. Om een idee te krijgen van de verschillende vormen van slijtage is ter informatie in kader 1 een overzicht gegeven van de meest voorkomende typen.

abrasieve slijtage: slijtage door verplaatsing van materiaal veroorzaakt door harde deeltjes of harde ruwheidstoppen.
adhesieve slijtage: slijtage door overdracht van materiaal van het ene oppervlak naar het andere tijdens een relatieve beweging tussen de beide oppervlakken, ook wel koudlassen genoemd.
erosieve slijtage: verlies van materiaal uit een vast oppervlak als gevolg van een langsstromend vloeibaar of gasvormig medium dat vaste deeltjes bevat.
cavitatie erosie: slijtage van een vast lichaam dat een relatieve beweging maakt ten opzichte van een vloeistof in een gebied waar dampbellen inklinken, wat een hoge lokale schokwerking in druk of temperatuur teweegbrengt.
corrosieve slijtage: slijtageproces waarin een chemische of elektrochemische reactie met de omgeving overheerst.
oxidatieve slijtage: corrosieve slijtage waarbij de chemische reactie met zuurstof of een oxiderende omgeving overheerst.
vermoeling: slijtage die optreedt als gevolg van een herpeeterend proces van wisselende belastingen in het elastische gebied waardoor scheurtjes kunnen ontstaan die niet altijd zichtbaar zijn.

kader 1 Overzicht van de verschillende soorten slijtage

TiN coatings worden zowel via PVD als CVD vervaardigd en hebben een goudkleur, terwijl een mengsel van TiN en Ti₂N (harder en brosser dan alleen TiN en om die reden vooral toegepast waar abrasie het belangrijkste slijtagemechanisme is) zilverkleurig is. De taaiheid van de TiN coating is hoog, waardoor scheuren en andere schade aan snijranden wordt voorkomen, ook bij hoge contactspanningen. TiN heeft een lage wrijvingscoëfficiënt tegen metalen, zodat lage wrijvingskrachten ontstaan bij snijden of omvormen. Bovendien heeft TiN geen neiging om te hechten aan de te verwerken metalen, zodat standtijden relatief lang zijn.

TiC coatings worden via CVD aangebracht en belangrijke kenmerken zijn een sterke adhesie aan hardmetalen en stalen basismaterialen en een hoge hardheid, zodat de weerstand tegen abrasieve slijtage goed is. De weerstand tegen adhesieve slijtage en oxidatie, en de chemische stabiliteit zijn enigszins slechter dan die van TiN. TiC wordt voornamelijk als enkelvoudige laag gebruikt als abrasie het dominante slijtagemechanisme is. In andere gevallen wordt het in multilaag coatings toegepast samen met TiN en TiCN of met Al₂O₃.

TiCN coatings zijn mengvormen van TiC en TiN die in alle verhoudingen kunnen worden gemengd tot TiCN, waarbij de hardheid varieert tussen 2600 en 3400 HV. De weerstand tegen abrasieve slijtage van TiCN is hoger dan die van TiN, maar de taaiheid is lager dan die van TiN. De taaiheid kan echter worden verbeterd door middel van een multilaag opbouw.

CrN coatings worden uitsluitend via PVD gemaakt en zijn zeer goed bestand tegen oxidatie en corrosie. Bovendien is CrN geschikt voor verminderde adhesie van kunststoffen en elastomeren aan matrijswanden. Het heeft een hogere oppervlaktehardheid en taaiheid dan TiN, zodat de slijtageweerstand van CrN beter is. De laagdikten van CrN (tot 50 µm) kan hoger zijn dan die van TiN, en dat is de reden voor de hogere gemeten hardheid (bij dunne lagen wordt vaak de hardheid van het zachtere basismateriaal meegemeten, zodat een lagere hardheid van de dunne laag wordt gemeten). De

adhesie van CrN en TiN tegen andere oppervlakken zijn vergelijkbaar, terwijl adhesie en cohesie van Cr(C,N) matig zijn. Slijtagegedrag van Cr-basis coatings is beter dan van TiN, zowel droog als gesmeerd. Dus dikke CrN lagen zijn gunstiger uit slijtageoogpunt dan TiN lagen [13].

TiAlN coatings zijn een verdere ontwikkeling van TiN, waarbij een deel van het Ti is vervangen door Al. De coatings worden via PVD vervaardigd en hebben een hardheid tussen 2400 en 3500 HV. Kenmerken van TiAlN zijn een hoge oxidatiestabiliteit, hoge hardheid bij verhoogde temperatuur en thermische isolatie. TiAlN coating wordt toegepast op gereedschap voor droogverspanen, hardmetaal verwerking en hoge-snelheidsfrezen. Op een TiAlN coating vormt zich een dunne laag Al₂O₃, die zichzelf continu herstelt en daardoor de coating tegen verdergaande oxidatie en slijtage beschermt (figuur 8).



figuur 8 Voorbeeld van een PVD TiAlN coating op een mes

AlCrN coatings zijn sinds enige tijd commercieel verkrijgbaar. Deze coatings onderscheiden zich van andere harde coatings door hun hoge hardheid, ook bij verhoogde temperatuur (tot 1100 °C), hun hoge slijtvastheid (beter dan TiCN en TiAlN op hardmetaal) en hun hoge oxidatiebestendigheid. De hoge hardheid bij verhoogde temperatuur maakt deze coating uitermate geschikt voor hoge-snelheidsfrezen (zie figuur 9).



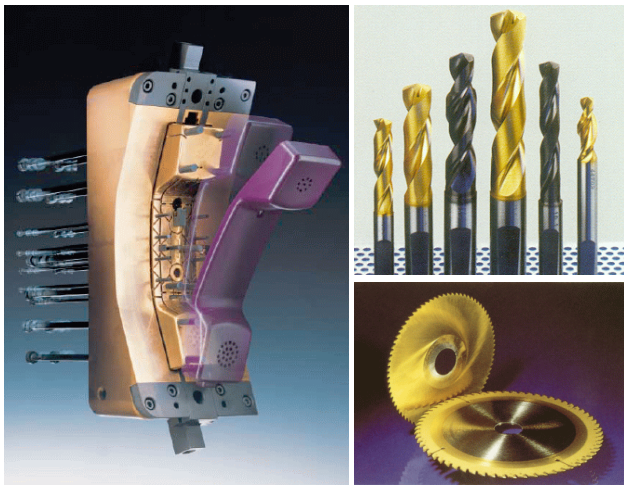
figuur 9 AlCrN PVD coating aangebracht op hardmetaal frezen

Al₂O₃ coatings worden via CVD aangebracht en in de regel als multilaagcoating met andere harde materialen aangebracht. De coatings hebben een hoge thermische en chemische stabiliteit, een hoge hardheid bij verhoogde temperatuur en een geringe neiging tot adhesie met ander materiaal. Om die reden worden ze vaak toegepast voor het verspanen van metaal.

Koolstofhoudende coatings is een betere benaming dan DLC (diamond-like-carbon). Ze bevatten koolstof en waterstof in verschillende verhoudingen en onderscheiden zich van andere harde coatings door hun lage wrijvingscoëfficiënt tegen andere materialen onder droge omstandigheden. Ze worden om die reden vaak toegepast om wrijving en slijtage te verminderen.

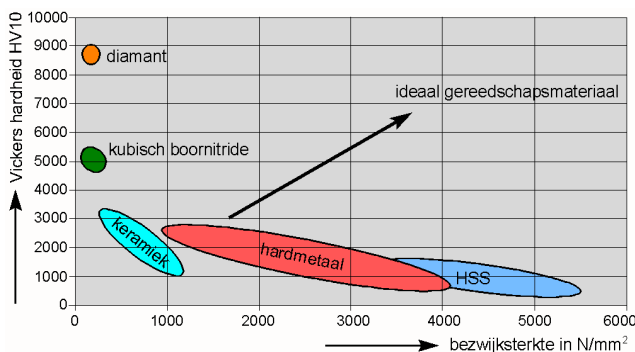
Diamant coatings (zie koolstofhoudende coatings) worden aangebracht op hardmetaal en keramiek via PA-CVD (plasma assisted) bij 700-800 °C. Diamant is zeer hard en heeft om die reden een prima weerstand tegen abrasieve slijtage, een geringe neiging tot hechten aan andere materialen en een lage wrijvingscoëfficiënt tegen andere materialen. Vanwege de oplosbaarheid van koolstof in ijzer zijn diamant gecoate gereedschappen niet geschikt voor het verspanend bewerken van staal bij verhoogde contacttemperaturen. Bovendien is het om die reden niet zonder meer mogelijk om diamant rechtstreeks op staal maar wel direct op hardmetaal aan te brengen. Diamant coatings worden gebruikt voor het bewerken van gevulde kunststoffen, grafiet, hardmetaal en keramiek, en het snijden van abrasief materiaal zoals Al-Si legeringen.

Figuur 10 laat nog enkele toepassingen zien van coatings op matrijzen, boren en zaagbladen.



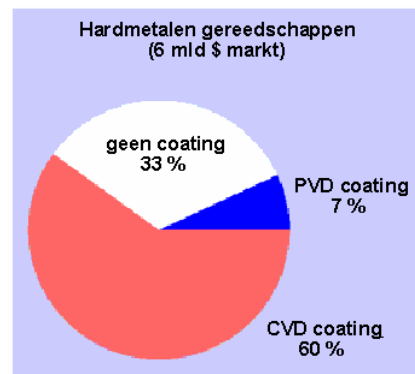
figuur 10 Toepassing van coatings op matrijzen, boren en zaagbladen

De ontwikkeling van verspanende gereedschappen is zodanig, dat wordt gestreefd naar materialen die zowel een hoge hardheid als een hoge bezwijksterkte (gerelateerd aan de breuktaaiheid) hebben. In Figuur 11 is deze ontwikkeling schematisch weergegeven [17]. Een mogelijkheid om een hogere hardheid bij een zelfde bezwijksterkte te realiseren is het aanbrengen van een geschikte coating.



figuur 11 Ontwikkeling van materiaalgebruik voor verspanende gereedschappen

Voor hardmetalen gereedschap geldt dat 1/3 niet wordt voorzien van een coating, terwijl 2/3 wordt voorzien van een PVD of CVD coating, waarbij het merendeel van een CVD coating wordt voorzien (figuur 12). Dit gold in 2001 maar is in de tussenliggende jaren niet drastisch gewijzigd.



figuur 12 Verdeling van hardmetalen gereedschap in aandeel dat wordt gecoat [17]

CVD coatings worden veel toegepast op verspaningsgereedschappen. Meer dan 60% van de verspaningsgereedschappen in de USA en West-Europa hebben een CVD coating.

Veel onderzoek heeft aangetoond dat coatings de spaanvorming beïnvloeden en de tribologische interactie tussen verspaningsgereedschap en contactvlak. Van groot belang hierbij is de invloed van de thermische eigenschappen van coatingcomponenten en de coatingstructuur op het gedrag van het verspaningsgereedschap. Met name de warmtegeleiding en de soortelijke warmte van de materialen die met elkaar in contact zijn, spelen een dominante rol [8] (zie ook kader 2).

Zoals reeds eerder is vermeld, zijn de eigenschappen van de lagen sterk afhankelijk van de manier van aanbrengen van de lagen. Een voorbeeld hiervan is TiN, waarvan de verhouding tussen titaan en stikstof kan variëren, afhankelijk van de verwerking. Daarmee gaan ook veranderingen in de eigenschappen van het TiN gepaard. Afhankelijk van de toepassing en het slijtage-mechanisme van het TiN kan worden gekozen voor een 1:1 verhouding tussen titaan en stikstof of een afwijking van die verhouding. Bovendien heeft ook de coatingtechniek invloed op de eigenschappen van TiN: de slijtageweerstand is veel hoger bij ionenimplantatie en boogverdamping van TiN dan van magnetron sputteren of plasma assisted CVD TiN [4].

kader 2 Eigenschappen van een coating als functie van de aanbrengtechniek

Hiermee wordt nogmaals benadrukt dat een constructeur goed moet weten aan welke eisen het product moet voldoen, zodat een goede keuze van basismateriaal en coating kan worden gemaakt.

De coatings die tot nu toe zijn genoemd, worden al toegepast en zijn commercieel verkrijgbaar. Vanzelfsprekend is er een continue ontwikkeling gaande van verbetering van bestaande coatings en produceren van nieuwe coatings. De drijvende kracht achter de voortdurende ontwikkeling van nieuwe coatings zijn be- en verwerken van metalen en kunststoffen zonder smering of koeling, hogere verspaansnelheden, verspanen van hardere materialen, gebruik van coatings bij hogere temperaturen, enz.

3 Procesomschrijvingen

Om te schetsen wat wel kan en wat niet kan met harde dunne lagen, is het van belang te weten hoe deze harde dunne lagen worden aangebracht. Het grootste aantal dunne lagen op gereedschappen wordt via een PVD of CVD proces aangebracht.

PVD (Physical Vapour Deposition)

PVD is een techniek waarbij materiaal in hoogvacuüm tot verdamping wordt gebracht via sublimatie en op een gewenste locatie direct wordt neergeslagen vanuit de

gasfase (rijpen). Typische opdamptemperaturen van coatings variëren tussen 200 en 500 °C, hoewel bij sommige processen, zoals het coaten van kunststofonderdelen, de temperatuur kan worden teruggebracht tot 60 °C. Tijdens het PVD proces is sprake van mechanische verankering, fysische binding en gedeeltelijk chemische binding met het basismateriaaloppervlak. Harde PVD lagen worden sinds 1980 industrieel toegepast, het PVD proces zelf bestaat al sinds de 50-er jaren (opbrengen van aluminium). Tijdens het PVD proces moet het basismateriaal ten opzichte van de bron worden bewogen om een homogene bedekking van het basismateriaal te bereiken (een zogenoemd *line-of-sight* proces). De oppervlakteruwheid van het werkstuk na PVD behandeling blijft vrijwel gelijk aan die van het oorspronkelijke basismateriaal.

CVD (Chemical Vapour Deposition)

CVD is een techniek, waarbij verschillende gassen onder atmosferische omstandigheden of in laagvacuüm met elkaar reageren op het basismateriaaloppervlak. Omdat dit oppervlak vaak initieel bij deze reactie is betrokken, is er sprake van een chemische binding tussen basismateriaal en coating. CVD processen verlopen in de regel bij temperaturen tussen de 700 en 1000 °C. Opdamptemperaturen beneden de 700 °C worden bereikt via aangepaste processen. *Plasma-enhanced of plasma-assisted CVD* (PE-CVD of PA-CVD) vindt plaats bij temperaturen beneden de 200 °C. CVD wordt sinds 1968 industrieel toegepast. De bedekbaarheid van een basismateriaal via het CVD proces is probleemloos, ongeacht de geometrie van het werkstuk, omdat dit door gas wordt omspoeld. Bij CVD vindt meestal een toename van de oppervlakteruwheid plaats, o.a. vanwege grotere laagdikten. De verklaring hiervoor is dat het gas in de CVD opstelling reageert met het oppervlak en dat gebeurt het eerst op de meest reactieve plaatsen van het oppervlak. Van daaruit "groeit" de coating verder en wordt de rest van het oppervlak bedekt. De coating op de reactieve plaatsen groeit echter verder zodat een ongelijke dikte op microschaal ontstaat. Dit is de ruwheid die resulteert. Bij het aanbrengen van met name CVD bedekkingen op geharde stalen, moet worden gedacht aan de warmtebehandeling, waarbij een omzetting van austeniet naar martensiet in het basismateriaal kan optreden, wat gepaard gaat met volumeverandering. Bovendien wijzigt daardoor de hardheid van het staal (het CVD proces vindt meestal bij verhoogde temperatuur plaats, tot boven de 900 °C), zodat na de CVD behandeling het staal opnieuw een warmtebehandeling moet ondergaan [5]. De bewerkbaarheid van PVD en CVD coatings is beperkt, vanwege de vaak geringe laagdikte en coatingeigenschappen. De kostprijs voor beide processen is relatief hoog en ze zijn relatief milieuvriendelijk (geldt minder voor CVD). Figuur 13 toont een voorbeeld van een PVD installatie, waarin verschillende te coaten onderdelen worden geplaatst.



figuur 13 Voorbeeld van een PVD installatie, waarin verschillende te coaten onderdelen worden geplaatst

4 Ontwerpaspecten

Voor het ontwerpen van producten met een harde dunne laag gelden andere ontwerperegels dan voor het ontwerpen van dezelfde producten zonder harde dunne laag. Voor een deel overlappen de regels elkaar, voor een deel moet er anders worden "gedacht". Bij het maken van een keuze voor een harde dunne laag en het aanbrengproces moet men rekening houden met de volgende aspecten [1]:

1. Welke **functionele eigenschappen** van het product spelen een belangrijke rol, waarmee wordt bedoeld hoe het product het beste kan worden voorbereid op de functie die het moet vervullen; moet bijvoorbeeld bij een gereedschap de wrijving ten opzichte van het tegenmateriaal zo laag mogelijk zijn, moet de slijtage tot een minimum worden beperkt, speelt corrosieve slijtage een belangrijke rol met betrekking tot de werking van het product of de standtijd van een gereedschap?
2. Uitgaande van de **toepassing**, zoals bijvoorbeeld het gereedschap voor omvormen, spuitgieten, verspanen e.d., moet worden afgewogen welke invloeden op het product worden uitgeoefend en hoe het product hier tegen kan worden beschermd.
3. **Oplossingen** kunnen worden gevonden in het product zelf, zoals constructie en basismateriaal, voorbehandeling (harden en ontlaten, bepaalde oppervlakteruwheid aanbrengen, textuur aanbrengen), maar ook via het aanbrengen van een coating, indien deze extra voordelen met zich meebrengt, zoals lagere wrijving, hogere hardheid, thermische isolatie, enz..
4. De aspecten genoemd onder de punten 1,2 en 3 maken deel uit van het **integraal** ontwerpen van coatings. Hiertoe behoren ook zaken als recycling, milieuaspecten (gebruik van smering en/of koeling), reparatie en opnieuw coaten.

Bovendien worden de eigenschappen van dunne coatings, zoals bij alle materialen, bepaald door hun chemische samenstelling, structuur en opbouw. Deze eigenschappen kunnen worden beïnvloed door selectie van de coatingtechniek zoals in de hoofdstukken 2 en 3 is besproken.

4.1 Basismateriaal

Er kunnen zeer uiteenlopende materialen worden voorzien van een PVD of CVD coating, zo lang deze materialen in vaste toestand blijven tijdens het coaten, geen te hoge uitgassing vertonen en geen materiaaltransformaties plaatsvinden die negatief kunnen zijn voor het functioneren van het product in de praktijk [18]. Dit betekent dat vrijwel alle metalen (zoals stalen, hardmetalen, legeringen, enz.), keramieken, glas en kunststoffen kunnen worden voorzien van een coating, mits de procesvoering hierop is afgestemd. Materialen die om bovengenoemde redenen niet zonder specifieke maatregelen kunnen worden gecoat, zijn tin, zink en lood. Deze metalen hebben een laag smeltpunt en een hoge dampspanning bij relatief lage temperaturen. Hierdoor wordt het aanbrengproces verstoord. Bovendien kunnen poreuze materialen, zoals bijvoorbeeld gesinterd materiaal, slechts onder bepaalde omstandigheden worden gecoat. De sterkte en hardheid van een basismateriaal dat gecoat dient te worden, moet tenminste zo hoog zijn, dat het materiaal ook in ongecoate toestand de functie zou kunnen vervullen waarvoor het wordt ingezet. Dit betekent in de praktijk, dat het aanbrengen van een zeer harde PVD of CVD coating op een relatief zacht basismateriaal niet wenselijk is, omdat het mogelijk is dat de lokale contactspanning op het materiaal zo hoog wordt, dat het basismateriaal vervormt en de coating deze vervorming niet kan volgen. Dit kan leiden tot optreden van scheurvorming in de coating en onthechting van basismateriaal en coating. Een oplossing hiervoor is het aanbrengen van een tussenlaag die fysische en mechanische eigenschappen heeft die tussen die van de coating en het basismateriaal in liggen.

De temperatuurbestendigheid van het basismateriaal is tevens een belangrijk aspect bij het coaten. De hardheid en geometrie van het basismateriaal kunnen worden beïnvloed als gevolg van structuurveranderingen, inwendige spanningen en volumeveranderingen ten gevolge van transformaties. Bij onderdelen die veredeld zijn, moet de ontlaattemperatuur zo'n 50 °C boven de temperatuur liggen waarbij wordt gecoat. Bij CVD processen kunnen temperaturen tot 1000 °C worden bereikt, wat tot gevolg heeft dat bijvoorbeeld bij geharde stalen de hardheid wordt gereduceerd en een nieuwe warmtebehandeling noodzakelijk is. In het algemeen geldt dat overleg met de jobcoater moet worden gevoerd, indien niet acceptabele beïnvloedingen vanwege de thermische belasting van het basismateriaal worden verwacht. Mogelijk kan dan een ander materiaal worden gekozen als basismateriaal.

De aanlevercondities van de basismaterialen spelen vanzelfsprekend een belangrijke rol bij het aanbrengen van een coating. De functionele oppervlakken moeten metallisch blank (roestvrij, lakvrij, vetvrij, enz.) zijn gemaakt via slijpen, polijsten, stralen, leppen of een lichte erosiebehandeling, zodat een geringe oppervlakteruwheid wordt verkregen.

Bij hardmetalen moet bijzonder worden gelet op beschadigingen die tijdens het bewerken zijn ontstaan, zoals uitbreken tijdens snijden, ontstaan van scheuren en afname van het matrixmateriaal, alsmede het aanwezig zijn van sinterhuiden.

Bij metalen basismaterialen moeten bramen worden vermeden, evenals slijphuid. Geërodeerde oppervlakken zijn alleen dan te coaten als ze licht nageërodeerd zijn of microgestraald (dit kan eventueel door de jobcoater zelf worden uitgevoerd).

Verder dient in zijn algemeenheid de afwezigheid van spanen (met name in boorgaten) en verontreinigingen zoals zoutresten, slijp-, polijst-, straal-, koel- en smeermiddelen gegarandeerd te zijn. Het is uiterst zinvol om de keuze van een anti-corrosiemiddel af te stemmen met de jobcoater, omdat dit middel vóór het coaten verwijderd dient te worden. In ieder geval moet een siliconenvrij anti-corrosiemiddel worden gebruikt.

4.2 Geometrische aspecten

De geometrie en constructie van te coaten materialen zijn eveneens aan grenzen gebonden.

Zo is de omvang van de kamer waarin de coating wordt aangebracht begrensd tot een volume dat verschilt van jobcoater tot jobcoater, zodat dit vooraf moet worden gecontroleerd door de ontwerper.

De geometrie van de te coaten onderdelen kan, zoals eerder gemeld, door de procestemperatuur worden beïnvloed. Het is dus zaak daarmee rekening te houden bij het bepalen van de maattolerantie.

Een voorziening om onderdelen te bevestigen kan noodzakelijk zijn, indien het te coaten vlak anders niet vrijligt. Delen van oppervlakken die pertinent niet of juist wel moeten worden gecoat, dienen door middel van een schets duidelijk te worden aangegeven op het bestelformulier (zie voor een voorbeeld Bijlage II).

Inwendige oppervlakken zijn via het PVD proces te coaten met een gegarandeerde coatinglaagdikte tot een diepte/diameter verhouding van 1:1. Bij een grotere diepte/diameter verhouding neemt de coatinglaagdikte af. Het CVD proces kent deze beperking niet.

4.3 (Voor)behandeling

Bij gesoldeerde onderdelen moet worden gelet op de temperatuurbestendigheid, de vacuumbestendigheid en het afwezig zijn van cadmium in de soldeerlegering. Bovendien moeten de plaatsen waar gesoldeerd is, vrij zijn van holtes en vloeimiddelen.

Gelijmde onderdelen zijn in de regel niet geschikt voor het aanbrengen van coatings, maar in overleg met de

jobcoater kunnen uitzonderingen worden gemaakt.

Voor een optimale coating is het aan te bevelen samengestelde onderdelen individueel aan te leveren. Dit geldt met name voor geschroefde verbindingen. Overigens moet worden gelet op verschillen in uitzettingscoëfficiënt van de individuele componenten.

Gelaste onderdelen dienen vooraf spanningsvrij te worden gegloeid en spleten en holtes dienen te worden vermeden. De oppervlaktebehandeling van te coaten onderdelen vereist bijzondere aandacht, omdat de hechtsterkte van coatings hier sterk door wordt beïnvloed.

Om deze reden moet met de jobcoater worden overlegd, indien oppervlakken vooraf worden of werden behandeld via thermische, chemische, chemothermische of elektrochemische processen, zoals nitreren, verchromen, vernikkelen, bruineren (tectyleren) en stoombehandeling van stalen.

4.4 Transportrichtlijnen

De te coaten onderdelen worden in de regel verstuurd en moeten om die reden worden verpakt. De verpakking dient ter bescherming tegen corrosie en mechanische beschadiging.

De verpakking van de te coaten onderdelen moet liefst herbruikbaar zijn, zodat de gecoate onderdelen in dezelfde verpakking kunnen worden teruggestuurd. Deze verpakking moet voldoen aan de volgende eisen:

- ▶ afzonderlijke verpakking in geval van aparte onderdelen;
- ▶ cassetteverpakking bij grote aantallen;
- ▶ te vermijden zijn verpakkingsmaterialen zoals rubber, kunststof en siliconen.

De verpakking dient vergezeld te gaan van volledig ingevulde formulieren en karakterisering van de verpakte onderdelen.

4.5 Coatingaspecten tijdens het ontwerpen

Indien tijdens het proces van keuzes en het zoeken naar oplossingen wordt besloten een coating te gaan gebruiken om de eigenschappen van het product te optimaliseren, moet aan nog andere aspecten worden gedacht dan de hiervoor genoemde.

Een TiN laag kan bijvoorbeeld zowel via PVD als CVD worden aangebracht. De slijtage van de TiN laag is afhankelijk van het productieproces van de coating. De slijtageweerstand van een TiN laag is veel hoger indien deze is aangebracht via ionenimplantatie of boogverdamping, dan via magnetron sputteren of *plasma assisted* CVD. PVD TiN is slijtvaster op oppervlakken met een ruwheid $R_z < 2 \mu\text{m}$, terwijl de CVD TiN slijtvastheid onafhankelijk is van de voorbehandeling van het basismateriaal. De reden hiervoor is de hogere coatingproces-temperatuur en de inherente richtingsuniformiteit van het CVD proces [6]. Is het TiN echter op veredeld staal aangebracht, dan moet worden afgewogen of de levensduur van het product belangrijker is dan de kosten van extra (be)handelingen van hardings- en ontlaatstappen.

Indien wrijving en slijtage tussen bijvoorbeeld een gereedschap en werkstuk belangrijke aspecten bij de standtijd voor dat gereedschap zijn, dan spelen tribologische overwegingen een prominente rol. De voor de hand liggende toepassing van tribologische coatings is de verlenging van de levensduur van de componenten waarop deze coatings zijn aangebracht. Andere positieve effecten van een tribologische coating zijn:

- ▶ verhoging van de verspaningssnelheid en daarmee de productiviteit (soms belangrijker dan de verlenging van de levensduur);
- ▶ verlaagde wrijving, wat vermindering van energieverbruik betekent en mogelijk uitsluiting of vermindering van het gebruik van smeer- en koelmiddelen;
- ▶ verminderd plakken aan en gereduceerde materiaaloverdracht van het tegenoppervlak. Dit is cruciaal

voor het goed functioneren van matrijzen en andere toepassingen waarin glijdend contact optreedt. Antikleef additieven kunnen worden weggelaten in omvormtoepassingen.

4.5.1 Coatings en spanningen

Tijdens het ontwerpen zijn twee types spanningen van belang:

- ▶ macroscopische contactgeometrie (bijvoorbeeld bol op vlak),
- ▶ spanningen die voortkomen uit microscopische contacten tussen ruwheidstoppen.

Het eerste spanningstype treedt op bij statisch contact, rollend contact of glijdend contact bij zeer lage wrijving, zodat de maximale schuifspanning relatief diep onder het oppervlak ligt. Voor een kogellager geldt dan bijvoorbeeld dat bij kogels van 10 mm doorsnee de maximale schuifspanning op ongeveer 0,2 - 0,3 mm diepte ligt, dus veel dieper dan de dikte van een PVD of CVD laag. In glijdend contact bij hoge wrijving komt de locatie van de maximale afschuifspanning in de buurt van het oppervlak (bij een wrijvingscoëfficiënt van ongeveer 0,3 en hoger ligt de maximale schuifspanning aan het contactoppervlak). Oppervlaktevermoeiing vanwege hoge cyclische spanningen treedt op bij kogellagers, tandwielen en andere machineonderdelen met niet-conforme contactoppervlakken (zie figuur 14). In glijdend contact tussen conforme oppervlakken zijn de hoogste contactspanningen beperkt tot de contactvlakken tussen de ruwheidstoppen. De hoogste spanningen treden op binnen een aantal μm vanaf het grensvlak en dan is het ontwerpen en toepassen van een dunne coating zinvol. Het is gunstig wanneer drukspanningen in een dunne coating aanwezig zijn, niet alleen voor de cohesie en breuktaaiheid van een coating, maar ook voor de slijtvastheid van een coating. Het is echter aangetoond dat CVD coatings van TiC, TiN en Al_2O_3 aangebracht op hardmetalen, trekspanningen veroorzaken, wat dus nadelig is.



figuur 14 Voorbeeld van een niet-conform rollend contact

Het is gunstig om de spanningen tussen de ruwheidstoppen minimaal te houden door het oppervlak zo glad mogelijk te maken. Dit wordt bereikt door het basis-materiaaloppervlak zo glad mogelijk te maken. In veel gevallen volgt de coating de geometrie van het basis-materiaaloppervlak, dus blijft het onderdeel glad. Bovendien is het uit oogpunt van adhesie en restspanningen aan te bevelen het oppervlak glad te maken. Anderzijds vormen in verspanen bewerkingen de werkstukken een beschermende oxidelaag op het gereedschap. De vorming van deze oxidelaag verloopt beter wanneer het oppervlak enigszins ruw is. De aanwezigheid van een oxidelaag is gunstig omdat dan geen metaal-metaal contact bestaat. Bovendien is het voor bijvoorbeeld glijlagers gunstig, wanneer een smeermiddel wordt vastgehouden door het oppervlak, wat bevordert wordt door oppervlakteruwheid.

4.5.2 Huidig ontwerp van coatings

In de regel worden drie coatingstructuren gemaakt: enkellaag, sandwich en gradueel opgebouwde coatings. Veel coatings zijn uit een **enkele laag** opgebouwd (TiC, TiN, CrN, Al_2O_3 en koolstofhoudende), zodat het basis-materiaal een hoge hardheid en hoge E-modulus moet hebben om het belastingdragend vermogen voldoende hoog te kunnen maken.

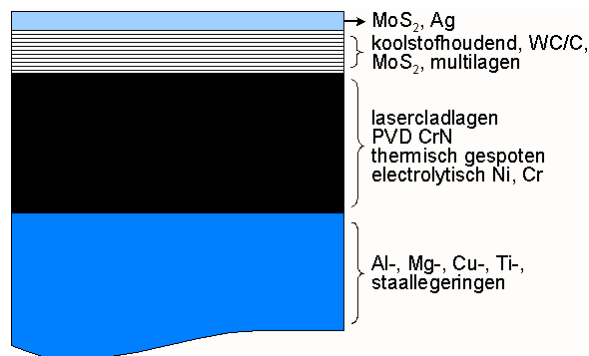
Multilaag coatings worden toegepast om kritische belastingen te kunnen opvangen. Het verspanen van RVS wordt vaak uitgevoerd met $\text{TiC-Al}_2\text{O}_3\text{-TiN}$ coatings op hardmetaal. TiC dient voor de hechting aan het hardmetaal, Al_2O_3 fungeert als slijtvaste laag bij verhoogde temperatuur en TiN geeft, naast een esthetische slijtatie (goudkleurig), een duidelijk visuele indicatie van slijtage. Bovendien heeft het goede anti-kleefeigenschappen.

Gradueel opgebouwde coatings (coatings waarbij de samenstelling geleidelijk verandert van boven naar beneden) hebben als groot voordeel dat het belastingdragend vermogen hoog kan zijn, omdat de mechanische spanningen geleidelijk kunnen worden afgebouwd. Tot nu toe wordt dit nog steeds vaak bereikt via nitreren en carboneren, maar tegenwoordig worden ook gradueel opgebouwde PVD Ti(CN) coatings hiervoor gebruikt.

4.5.3 Ontwerp van gecoate componenten

Voor verspaningsgereedschap zijn ontwikkelingen gaande om bij droog verspanen extra kosten voor koel- en smeervloeistoffen te besparen, wat tevens om milieuhygiënische redenen gunstig is. Hoge-snelheid verspanen van gehard staal kan zo'n hoge oppervlaktekwaliteit geven, dat nabewerking niet meer nodig is. Hiervoor zijn coatings nodig op het verspaningsgereedschap die een hoge hardheid, alsmede een thermische en chemische stabiliteit hebben.

Omvormgereedschap en machineonderdelen zijn componenten die nog niet vaak via PVD of CVD processen worden gecoat vanwege de geometrische omvang. Bovendien zijn veel gebruikte basismaterialen voor deze componenten ongeschikt voor behandeling bij temperaturen waarbij CVD coatings worden afgezet. Daarbij hebben de componenten vaak complexe vormen, zodat coaten via PVD moeilijk of onmogelijk is. Tevens zijn de kosten van de componenten zo hoog, dat de eindgebruiker terughoudend is met de toepassing van nieuwe coatings. Momenteel worden PEPVD CrN (PE = *plasma enhanced*), PEPVD TiN en koolstofhoudende of WC/C coatings toegepast. Vele componenten worden uit lichtgewicht metalen vervaardigd, zoals aluminium, titaan en magnesium. Coatings op deze relatief zachte materialen vereisen een tussenlaag die het belastingdragend vermogen verhogen. De belangrijkste parameters van de coating zijn laagdikte en E-modulus om plastische vervorming te voorkomen en elastische vervorming te minimaliseren. Mogelijk moet nog een coating op de PVD laag worden aangebracht die een lage wrijving garandeert. Deze coating zorgt dan voor een groter contactoppervlak, waardoor spanningspieken worden voorkomen. Bovendien levert deze coating een bijdrage aan geringe slijtage tijdens het inlopen (zie figuur 15).



figuur 15 Samenstelling van een composiet coating ontworpen voor zachte basismaterialen

Opnieuw coaten van producten (bijvoorbeeld gereedschappen) is mogelijk, indien de functionele oppervlak-

ken vóór het coaten mechanisch worden behandeld. In het voorkomende geval moet een coating volledig worden verwijderd, voordat opnieuw een coating kan worden aangebracht. Ook hierover moet overleg met de jobcoater worden gevoerd.

4.6 *Praktijkvoorbeeld*

Aan de hand van een voorbeeld uit de praktijk wordt aangetoond welke aspecten komen kijken bij het kiezen van een coating op een basismateriaal.

Om een matrijs voor het spuitgieten van glasvezelhoudende kunststoffen slijtvaster te maken en betere lossingseigenschappen te geven, werd besloten een koolstofhoudende laag aan te brengen op het matrijsoppervlak. Voor het basismateriaal werd gekozen voor aluminium, omdat een beperkt aantal producten zou worden gespuits met deze matrijs, aluminium beter en sneller te verspanen is dan matrijsstaal en om deze redenen het systeem goedkoper zou zijn dan in het geval matrijsstaal zou worden gebruikt als basismateriaal.

Het bleek dat het direct aanbrengen van een koolstofhoudende laag op aluminium geen goede matrijs voor het spuitgieten van kunststoffen opleverde. Het werd snel duidelijk dat de hechting van de koolstofhoudende laag aan het aluminium onvoldoende was en bovendien het verschil in hardheid tussen het aluminium en de koolstofhoudende laag zo groot was, dat een lokale mechanische belasting op de koolstofhoudende laag leidde tot falen van de laag.

De oplossing voor de problemen bleek te liggen in het toepassen van een nikkel tussenlaag. Deze tussenlaag zorgde voor een betere hechting tussen de koolstofhoudende laag en het basismateriaal en fungeerde als overgangslaag met betrekking tot de hardheid, waardoor de lokale mechanische belastbaarheid aanzienlijk hoger kon zijn.

5 *Testen en beproeven van dunne lagen*

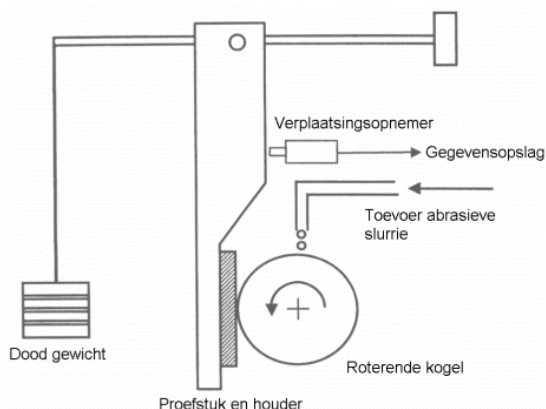
Het is vanzelfsprekend een voorwaarde om een coating te beproeven op zijn deugdelijkheid, voordat deze coating in de praktijk op een product wordt gebruikt. In de loop der jaren zijn talloze beproevingsmethodes bedacht, ontworpen en ontwikkeld, en een aantal daarvan is genormeerd volgens ASTM, DIN, ISO, enz.

Hoewel het enigszins buiten het bestek van deze publicatie valt, is het toch zinvol te weten welke beproevingsmethodes er zijn en welke informatie hiermee kan worden verkregen. Het geeft namelijk inzicht in het slijtagemechanisme en, indien onverhoopt een coating op een product voortijdig is bezwaken, is het goed te weten dat instituten en universiteiten de mogelijkheid hebben om via structuuranalyse, tribologische beproevingen en andere testmethodes te achterhalen waarom de coating is bezwaken en welke maatregelen genomen kunnen worden om dit in de toekomst te voorkomen. De eigenschappen van een coating die kunnen fungeren als kwaliteitscriterium, zijn onder andere coatinglaagdikte, chemische samenstelling, ruwheid, porositeit, structuur, interne spanningen, hardheid en hechting. Deze eigenschappen kunnen worden aangevuld met specifieke eigenschappen die zijn gerelateerd aan de speciale functie van een coating, zoals wrijvingseigenschappen, weerstand tegen slijtage en corrosie of biocompatibiliteit. Het is van groot belang dat zowel de jobcoater als de eindgebruiker overeenstemming bereiken over de uit te voeren testen. In het algemeen zijn testen langduriger en kostbaarder naarmate ze beter overeenstemmen met de praktijkomstandigheden waaronder de gecoate onderdelen moeten functioneren. Bovendien is het vaak niet mogelijk om relevante testen op onderdelen uit te voeren zonder deze te beschadigen. Daarom moeten eindgebruiker en jobcoater het eens worden over het type referentiemonsters die meebehandeld zijn met de onderdelen.

5.1 *Tribologische beproevingen*

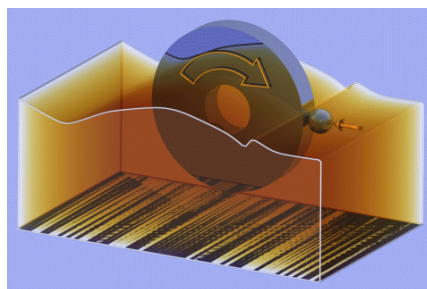
Een aantal relatief eenvoudige tribologische beproevingen zijn de navolgende:

1. **Krastesten** - Tijdens beproeving wordt de belasting op de (diamanten) tip opgevoerd en het faalcriterium kan zijn het optreden van een eerste scheur of cohesieve of grensvlakbreuk. Dit kan worden vastgelegd via wrijvingsmetingen en Akoestische Emissie (AE; een niet-destructieve onderzoeksmethode, die van geluidsgolven gebruik maakt). Optische microscopie en SEM geven meer info over het mechanisme.
2. **Abrasieve slijtage test** - De micro-abrasietest is een geschikte beproevingsmethode om dunne harde coatings op hun abrasieve slijtvastheid te beproeven (figuur 16). Belangrijke parameters bij deze test zijn de hardheden van coating en abrasief medium, de deeltjesgrootteverdeling en volumefractie van het abrasief medium, alsmede viscositeit en bevochtigingshoek van het vloeibare medium.



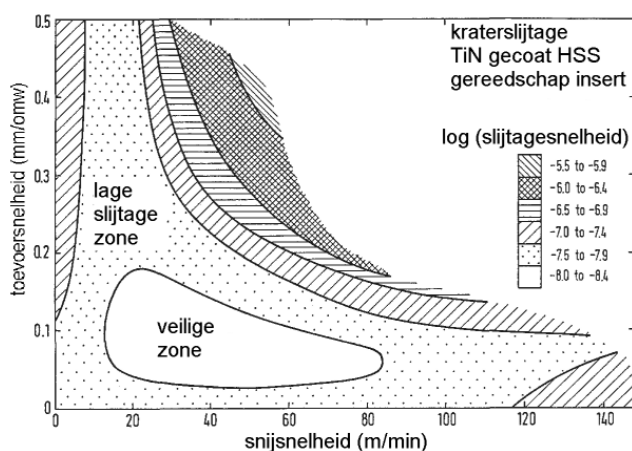
figuur 16 Schematische tekening van een micro-abrasie apparaat

3. **Erosietest** - Deze kan droog (straalbehandeling) of nat (slurrie erosie) worden uitgevoerd. Hierbij zijn hardheid en taaheid van de coating doorslaggevend voor de levensduur van de coating.
4. **Adhesieve slijtage test** - Hierbij wordt een glijdende beweging uitgevoerd tussen de coating en een tegenlichaam en wordt de wrijvingskracht gemeten die een maat is voor de hechting tussen coating en tegenlichaam. Tijdens de test kan overdracht van materiaal plaatsvinden via aanladen of koudlassen en met behulp van profilometers en een AFM (atomic force microscope; een instrument waarmee zeer kleine krachten kunnen worden gemeten) kan een zeer kleine volumeverandering worden gemeten.
5. **Rollende kogel beproeving** - Een zuiver rollend contact levert in de regel weinig slijtage op, maar in de praktijk is er heel vaak een glijdende component in droog of grensgesmeerd rollend contact (figuur 17) die lichte slijtage oplevert en uiteindelijk kan leiden tot oppervlaktevermoeiing [7].

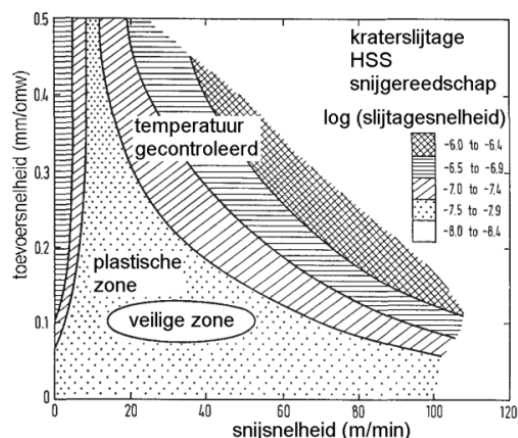


figuur 17 Schematische afbeelding van een rollende kogel beproeving

Het maken en interpreteren van *wear maps* (slijtage diagrammen) geeft inzicht in de mogelijkheden van gecoate onderdelen [9]. Voorbeeld: PVD gecoat HSS met TiN ($0,5 \mu\text{m Ti} + 3,5 \mu\text{m TiN}$). Beproevingen met verschillende verspanende snelheden en toevoersnelheid onder droge omstandigheden zijn uitgevoerd. De verspaningsdiepte was constant gehouden op 2 mm, omdat deze parameter blijkbaar de minste invloed op slijtage van verspaningsgereedschap heeft. Duidelijk is geworden dat verlaging van de slijtage afhankelijk is van de omstandigheden waaronder wordt gesneden. Wear maps geven een goed beeld van de overgangen van één dominant slijtagemechanisme naar het andere. In wear maps staan de verspaningssnelheid en de toevoersnelheid uitgezet. In de wear maps zelf staan dan de KT, maximale diepte van de slijtagekrater, of beter nog de $\log(KT/\text{verspaningsafstand})$ uitgezet. Voorbeelden van wear maps zijn gegeven in de figuren 18 en 19. De meetpunten zijn verkregen uit eigen onderzoek door de auteurs en literatuurwaarden uit andere bronnen.



figuur 18 Wear map voor slijtage van TiN gecoat HSS tijdens droog draaien. De gebieden waar de verschillende slijtagesnelheden zijn geconstateerd, zijn verschillend gearceerd. De veilige zone is het gebied waar de slijtagesnelheid het laagst is. Het gebied waar de minste slijtage optreedt, is ook opgegeven [9]



figuur 19 Wear map voor slijtage van ongecoat HSS gereedschap tijdens droog draaien [9]

Figuur 18 en figuur 19 tonen duidelijk de verschillende slijtagegebieden aan. Uit deze figuren komt goed naar voren dat toepassing van een TiN coating op HSS een vergroting van het werkgebied met weinig tot geen slijtage van het verspaningsgereedschap tot gevolg heeft.

5.2 Overige beproevingsmethoden

Een relatief eenvoudige en snel uit te voeren beproeving van 4 verschillende coatings, TiN, TiB₂, TiAlN en Ti(CN) is beschreven volgens het DIN Fachbericht 39 [11]. De hechting van deze coatings op een basismateriaal kan met een Rockwell hardheidsmeter worden bepaald via een classificatiesysteem (VDI indentatie).

Daarnaast zijn vermoeiingsbeproevingen uitgevoerd die een goede correlatie vertonen met de statische VDI indentatietest. Deze vermoeiingsbeproevingen zijn uitgevoerd met een hardmetalen cilinder die met een bepaalde frequentie en bij bepaalde druk op het gecoate proefstuk wordt gedrukt en teruggetrokken. TiAlN en Ti(CN) vertoonden de beste adhesie en vermoeiings-eigenschappen [10].

De VDI 3824 richtlijn geeft een overzicht van de procedures voor het testen en controleren van eigenschappen van onderdelen met een harde PVD of CVD coating [20]. In de richtlijn staan de uitvoering en beoordeling van de testen en procedures beschreven, evenals informatie over speciale kenmerken en problemen die van belang zijn bij het uitvoeren van de testen. Bovendien worden bestaande normen voor het uitvoeren van de testen vermeld in de richtlijn, die alleen uitgebreid ingaat op testen die gangbaar zijn, genormeerd zijn, niet-specifiek zijn voor bepaalde gereedschappen of toepassingen en breed geaccepteerd door jobcoaters. De belangrijkste vraag die altijd gesteld moet worden, is of een geselecteerde testprocedure de eigenschappen van een gecoat onderdeel voor een specifieke toepassing beschrijft en of reproduceerbaar testen mogelijk is.

Methoden voor inspectie van harde dunne lagen staan vermeld in bijlage III.

6 Kosten

De prijs van een PVD- of CVD-coating is hoofdzakelijk afhankelijk van het volume dat het onderdeel in beslag neemt in de coatinginstallatie.

Verder is de gevraagde coating van belang: een diamantcoating is duurder dan een TiN coating. De reden hiervoor is, dat de oven capaciteit, coatingscyclus, voorbehandeling, nabehandeling, materiaalkosten, enz. totaal verschillend zijn. Daarnaast is het product zelf een belangrijke indicator. Het coaten van een matrijs verloopt bijvoorbeeld totaal anders dan het coaten van een boor. Andere factoren die een rol spelen bij de vaststelling van de prijs van het coaten van onderdelen zijn: de aanleverconditie (gecoat of ongecoat), een hardmetalen of stalen basismateriaal, onderdelen met blinde gaten, alleen coaten van het functioneel gedeelte van het onderdeel, afdekken, gepolijst onderdeel, laagdikte, toleranties, warmtebehandeling, voorbehandeling, nabehandeling, controle, verpakking, levertijd, certificering, rapportage, enz. Kortom, het is lastig een prijs voor een PVD- of CVD-coating te geven. Desalniettemin is in tabel 4 een indicatie van prijzen van verschillende coatingtechnieken weergegeven.

Het aanbrengen van een deklaag wordt interessant, indien levensduur of productie wordt verhoogd.

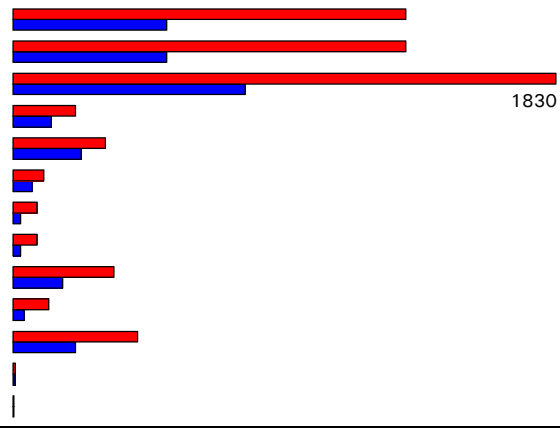
Belangrijke factoren zijn:

- de kosten voor het aanbrengen van een deklaag,
- de kosten voor de vervaardiging van het gereedschap,
- de inbouwkosten.

Een praktisch voorbeeld is het aanbrengen van een AlCrN coating op frezen.

De afweging die moet worden gemaakt, is: de kosten van het maken van de boortjes uit gereedschapstaal of HSS, het gebruik van koel- en smeermiddelen en een beperkte levensduur versus de kosten van het maken van de frezen uit gereedschapstaal of HSS, het laten aanbrengen van een AlCrN coating, eventueel geen gebruik hoeven maken van koel- en smeermiddelen en een langere

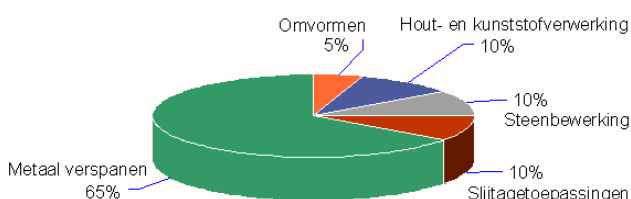
tabel 4 Globale kosten voor het aanbrengen van deklagen (stand 1996) [1]

deklaag type	proces	relatieve kosten van deklagen (€/m ²)	
		0	2000
Vanuit gasfase of opdammen	CVD		
	PVD		
	Ionimplantatie		
Thermisch/chemisch	Carboneren		
	Nitroren		
	Nitrocarboneren		
	Pakchromeren		
	Pakalumineren		
Thermisch/mechanisch	Plasmaspuiten		
	Vlamspuiten		
	Walsplateren		
Galvanisch/chemisch	Hardchroom		
	Stroomloos nikkel		
		max.	min.

levensduur. Waarschijnlijk is ook in dit geval de afweging afhankelijk van de toepassing. Indien de frezen worden ingezet in een geautomatiseerd massaproductieproces, zal de voorkeur waarschijnlijk uitgaan naar de frezen met een AlCrN coating, omdat het wisselen van de frezen openthoud geeft. In een gespecialiseerd proces waarbij weinig/geen automatisering is geïmplementeerd, kan het zijn dat het wisselen van frezen en de levensduur ervan ondergeschikt zijn aan de kosten van het freesproces zelf. Dan kan de voorkeur uitgaan naar het gebruik van ongecoate frezen.

7 Toepassingen

Toepassingen van harde dunne lagen is vooral interessant om het gebruik van relatief dure hardmetalen te reduceren. In plaats van hardmetaal kan een staal dat laagwaardiger en goedkoper is, worden gebruikt. Op dit staal kan dan een coating worden aangebracht. Toepassingen van hardmetalen vindt grotendeels plaats bij **verspanende gereedschappen**, al dan niet voorzien van een coating. In Figuur 20 is weergegeven wat de wereldwijde omzet is van de toepassing van hardmetaal, verdeeld naar toepassing.



figuur 20 Algemene toepassingsgebieden van hardmetaal (geschatte wereldomzet) verdeeld naar toepassing

In voorgaande hoofdstukken is al veel gezegd over harde dunne lagen en hun toepassing op verspanend gereedschap. Om die reden wordt in dit hoofdstuk meer de aandacht gelegd op spuitgiet- en omvormgereedschap. Harde dunne lagen worden toegepast op spuitgietgereedschap vanwege verlaging van de wrijving, verbetering van kleeft/lossing gedrag, reductie van corrosie en slijtage (erosie, abrasie), verkorting van cyclustijden en dode tijd en een verlaging van de onderhoudskosten [12]. De eisen die worden gesteld aan de oppervlaktekwaliteit van spuitgietgereedschappen, zijn:

- hoge hardheid van het deklaagsysteem, dus deklaag + basismateriaal;
- hoge taaiheid, zodat meer energie nodig is voor vervorming;

- hoge chemische inertie, dus deklaag met hoogste vormingsenergie;
- grotere laagdikte, is gunstig vanuit oogpunt systeemhardheid en corrosievastheid, ongunstig voor wat betreft hechting;
- goede corrosievastheid via dikke (> 10 µm), inerte en dichte lagen;
- goede hechting deklaag aan gereedschap via taaiheid van overgangszone tussen deklaag en gereedschap; roosterparameters van de kristalstructuur van gereedschap en deklaag vergelijkbaar, zuiverheid gereedschapsoppervlak, vergelijkbare E-moduli, inwendige spanningen niet te hoog in deklaag of gereedschapsoppervlak.

Belangrijke aandachtspunten voor het aanbrengen van een harde dunne laag op spuitgietgereedschap zijn: compatibiliteit tussen gereedschap en deklaag, de geometrie van het gereedschap, de reinigbaarheid, afmetingen, lage massa, ontlaatbestendigheid, de oppervlakteruwheid mag niet verslechteren ten gevolge van het coaten, verschil in thermische uitzettingscoëfficiënt tussen coating en gereedschap moet klein zijn, goede nabewerkbaarheid, repareerbaarheid, kostprijs, milieuaspecten.

Levensduurverbeteringen van **spuitgietmachineonderdelen** kunnen worden bereikt door toepassing van coatings op verschillende onderdelen. In tabel 5 staat een aantal voorbeelden genoemd van toegenomen standtijden van onderdelen van spuitgietmatrijzen door toepassing van dunne harde coatings.

In veel gevallen worden dunne coatings aangebracht om wrijving en slijtage te verminderen, waarbij een toename in productiviteit wordt bereikt, een verbeterde betrouwbaarheid is verkregen en de veiligheid tijdens bedrijf is verhoogd. Bovendien kunnen met innovatieve harde coatings nieuwe producten worden vervaardigd.

In de volgende toepassingsgebieden werd een aanzienlijke reductie in wrijving en slijtage behaald, dankzij de gebruikmaking van harde coatings [16]:

- Reductie van abrasieve slijtage**, bijvoorbeeld slijtage aan spuitgietmatrijzen voor kunststoffen gevuld met een abrasief medium, bewerken van hout, bewerken van gietmaterialen, bewerken van IC's, bewerken van keramisch materiaal.
- Reductie van adhesieve slijtage**, bijvoorbeeld vorming van afzettingen op matrijswanden, voorkomen van de vorming van opstaande randen bij verspaningsgereedschap.
- Tegengaan van oxidatie en diffusie**, bijvoorbeeld slijtage als gevolg van diffusie bij verhoogde tempe-

ratuur vanuit het gereedschap in de spaan, slijtage als gevolg van oxidatie veroorzaakt door materiaalveranderingen tijdens het oxidatieproces en de daarmee gepaard gaande verwijdering van materiaal in hoogbelaste gereedschappen voor metaalsnijden.

- **Reductie van slijtage via cavitatie**, bijvoorbeeld pomp-onderdelen.
- **Reductie van wrijving**, bijvoorbeeld vermindering van stick-slip verschijnselen in glijdende onderdelen of tijdens verspanende bewerkingen.

tabel 5 Voorbeelden van verhoging van de levensduur van spuitgietmatrijzen via toepassing van dunne lagen [12]

onderdeel	kunststof	onbedekt	bedekt	
		aantal injecties	deklaag	aantal injecties
Matrijs (1.2379)	POM	500.000	PVD TiN	> 3x10 ⁶
Schroef (stellietlaag of genitreerd)	Glasgevuld fenol	3 weken	II ¹⁾	x5 t.o.v. onbedekt
Getextureerde matrijs (verchroomd)	Fenol	3 maanden (24 uur/dag)	II ¹⁾	x4 t.o.v. onbedekt
Matrijsstaal	15% glas-gevuld polyester	31.000	II ¹⁾	684.000
Matrijs ²⁾	Thermo-harder	10.000	Cr Cr + II ¹⁾	25.000 100.000
Matrijsstaal	Fenol	100.000	PVD TiN	1.000.000
Matrijs ²⁾	Duroplast	25.000	PVD TiN	100.000
Matrijs ²⁾	POM	20.000	PVD TiN	40.000 (halvering reinigings-tijd)

1) II = ionenimplantatie
2) in een aantal gevallen was niet duidelijk in de literatuur terug te vinden welk materiaal voor de matrijs werd gebruikt

In geval van hoge corrosieve belastingen zijn basismaterialen die zijn voorzien van een dichte coating voldoende beschermd tegen corrosie. Op basismaterialen kunnen eventueel corrosiebeschermende lagen worden afgezet via bijvoorbeeld een galvanisch proces, maar ook via PVD of CVD (multilagen zijn eventueel ook mogelijk).

De selectie van harde coatings, basismateriaal (vaak gehard gereedschapstaal of hardmetaal) en de eventuele aanpassing van coating/basismateriaal eigenschappen zijn afhankelijk van het belangrijkste slijtagemechanisme dat optreedt. Andere variabelen bij de keuze van coating en basismateriaal zijn koeling, lossing en smering.

Belangrijke overwegingen bij de keuze van een basismateriaal zijn de vermoeiingslevensduur en sterkte. Vanwege de langere levensduur van een gereedschap dat is voorzien van een coating, dient een basismateriaal van goede kwaliteit te worden gekozen. Harde coatings zijn al succesvol toegepast in de volgende gebieden:

- verspaningsgereedschap, dat wordt gebruikt voor draaien, frezen, boren, ruimen, zagen, draadsnijden, brotsen, vertanden;
- omvorm- en stansgereedschap zoals stempels, mallen, walsen, trek- en drukgereedschappen;
- gereedschap voor kunststofverwerking zoals spuitgietmatrijzen, uitwerpers, terugstroomonderdelen, extrusiegereedschap;
- gereedschap voor gieten zoals mallen en aandrijfassen;
- gereedschap voor textielverwerking zoals messen;
- gereedschap voor glasverwerking zoals messen, draadgeleiders en weefmachinecomponenten.

Afgezien van het succesvol toepassen van harde coatings op gereedschappen, worden ook andere producten al voorzien van een dunne, harde en beschermende coating. Met name in omgevingen waar de belasting, mechanisch of chemisch, hoog is, is de wens/noodzaak om dunne harde coatings toe te passen groot. Zo worden in de auto- en motorracerij dunne harde coatings op verschillende onderdelen aangebracht, waaronder cilinders, kleppen en zuigers.

8 Normen

Een overzicht van normen welke betrekking hebben op oppervlaktetechnieken is beschikbaar op de website www.coating-online.nl.

9 Toekomstige ontwikkelingen

Nieuwe coatings

Er wordt continu onderzoek verricht naar betere coatings die een breed toepassingsgebied hebben of coatings die voor een specifiek doeleinde worden ontworpen (bijvoorbeeld de TiN/TaN superrooster coating). Dit onderzoek vindt voornamelijk plaats aan universiteiten en onderzoeksinstituten. De coatings die hierna worden genoemd, verkeren grotendeels nog in het ontwikkelingsstadium en zijn om die reden nog nauwelijks of niet commercieel verkrijgbaar. In de coatingwereld zijn snelle ontwikkelingen aan de orde van de dag. Dat wil zeggen dat een oplossing via het aanbrengen van een coating X vandaag, morgen een hele andere oplossing kan zijn via het aanbrengen van een coating Y. Hiermee wordt nogmaals duidelijk gemaakt dat bij het zoeken naar een oplossing in de vorm van een coating, het contact met de jobcoater noodzakelijk is.

1. Nieuwe coatingmaterialen

Diamant coatings zijn sinds 1996 toegepast voor het verspanen van aluminium. Voordelen van diamant: hoge hardheid, goede slijtvastheid, lage wrijving, hoge thermische geleiding en milieuvriendelijk, zowel in de productie als in het gebruik. Diamant wordt pas echt interessant als coatingmateriaal, indien het bij lagere temperatuur kan worden afgezet via PVD of CVD, de taaiheid kan worden verbeterd, het niet alleen op hardmetaal kan worden afgezet en de oppervlakteruwheid voldoende laag is na afzetting, omdat nabewerken buitengewoon lastig is.

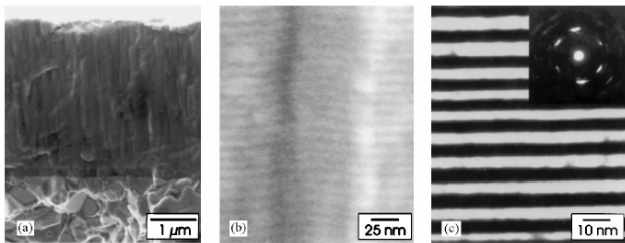
CBN (kubisch boornitride) is na diamant het hardste materiaal (5200 HV). Momenteel wordt CBN via het HIP proces vervaardigd en gesoldeerd op hardmetalen verspaningsgereedschappen. Direct aanbrengen van bruikbare CBN coatings via PVD is nog niet mogelijk, vanwege veel te hoge drukspanningen die ontstaan in de coatings. Laagdikten tot 200 nm zijn nu mogelijk.

Koolstofnitride (C₃N₄) is theoretisch harder dan diamant, maar alleen als het dezelfde kristalstructuur heeft als Si₃N₄. Tot nu toe is echter nog niemand erin geslaagd een volledig kristallijn C₃N₄ te maken, maar wel C_xN_y dat een zeer hoge elasticiteit en hoge hardheid heeft (15-60 GPa). Stabiliteit is nog matig: tot 600 °C in lucht, daarboven komt N₂ vrij en wordt het zachter.

- Duplex coatings** - de meeste PVD en CVD coatings zijn relatief bros en moeten om die reden worden aangebracht op harde en stijve materialen, zoals gehard staal, hardmetaal of keramiek. Op zachtere basismaterialen is een tussenlaag nodig. Voor staal- en titaanlegeringen is dit bijvoorbeeld een nitreerlaag. De combinatie van een nitreerlaag en een PVD coating wordt duplex coating genoemd.
- Multilaag coatings** - onderscheiden zich van sandwich coatings doordat ze een wisselende laagopbouw hebben van lamellen van 2 of meer materialen; de dikte van de lamellen varieert van enkele nm tot tienden

van μm . Coatings die een multilaagopbouw hebben, zijn harder en taaier dan homogene coatings van dezelfde materialen, omdat de lamelleuze structuur het glijden van dislocaties en scheurgroei belemmert.

4. **Superrooster coatings** - multilaag coatings opgebouwd uit materialen met gelijke kristalstructuur neigen tot de vorming van kolomvormige kristallen die zich door de gehele coating uitstrekken, vooropgesteld dat de dikte van de individuele lamellen niet groter is dan 5-25 nm. Eén van de eerste voorbeelden van zo'n coating is de combinatie van TiN/VN en TiN/NbN. Dit type coating heeft een hogere hardheid en taaierheid dan de enkelvoudige lagen van deze materialen. Overigens is dit type versteviging bekend uit de klassieke metallurgie. Een geschikte selectie van materialen geeft de mogelijkheid de weerstand tegen slijtage, corrosie, oxidatie, hoge wrijving enz. te verhogen. Een goed voorbeeld hiervan is een superroostercoating opgebouwd uit TiN en TaN lamellen, waarmee uitstekend RVS is te verspanen (figuur 21). De vermoedelijke reden hiervoor is de combinatie van een zeer hoge taaierheid en een geringe affiniteit van TaN (tantaalnitrider) met het RVS.



figuur 21 Dwarsdoorsnede van een TiN/TaN polykristallijn superrooster op HSS, (a) SEM opname van een fijnkorrelige, kolomvormige structuur, (b) vergrote weergave van (a), (c) TEM opname van het superrooster [7]

5. **Gedoteerde koolstofhoudende lagen** waar binnen een breed bereik de eigenschappen kunnen worden gevarieerd van elektrisch isolerend tot volledig geleidend, of de adhesieve eigenschappen kunnen worden gewijzigd.
6. **Nanokristallijne coatings** - de vloeispanning, hardheid en taaierheid van polykristallijn materiaal nemen toe met afnemende korrelgrootte (Hall-Petch relatie, de rekgrens van een materiaal is omgekeerd evenredig met de wortel van de korrelgrootte). Hetzelfde lijkt op te gaan voor dunne coatings met korrelgroottes in het nm gebied. Afgezien van de verbetering van mechanisch eigenschappen kunnen nanokristallijne materialen een hogere thermische uitzetting, lagere thermische geleiding en unieke optische, magnetische en elektronische eigenschappen hebben. Momenteel is onderzoek gaande naar de toepassing van nanokristallijne structuren in bulk materialen en dunne coatings voor tribologische toepassingen.
7. **Multi-component coatings** - bestaan uit 2 of meer bestanddelen in de vorm van korrels, deeltjes of vezels; wordt nog weinig toegepast voor de versteviging van coatings.
8. Er wordt een **overgang van CVD-TiC/TiCN/TiN naar CVD- Al_2O_3 coatings** voorzien met beheerste depositie van $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ en $\kappa\text{-Al}_2\text{O}_3$. Het vooruitzicht van de leidende producenten van verspaningsgereedschappen is, dat in de toekomst het gereedschap, bulkmateriaal of coating is gebaseerd op **taai keramiek, diamant en PCBN (polykristallijn boornitrider)**. De trend naar veelvuldig gebruik van **PCD/PCBN** (PCD = polykristallijn diamant) is geconstateerd in Japan.

9. **Toepassing van PVD coatings** neemt steeds meer toe ten koste van CVD coatings. CVD coatings worden vooral nog toegepast op zonnecellen, in de IC industrie, op glas (hoog-rendementsglas, zelfreinigend glas) en op thermisch en mechanisch zwaar belaste gereedschappen (beitelplaatjes).

Al deze ontwikkelingen op coating(materiaal)gebied zijn erop gericht de levensduur van producten en gereedschappen te verlengen, de slijtage te verminderen, de wrijving tussen gereedschap en product te verlagen, het gebruik van koel- en smeermiddelen terug te brengen en nog meer bewerkingsprocessen (verder) te automatiseren.

Referenties

- [1] C.P. Scheepens, G.H. Nijhof, IOP 7.1: Oppervlakte-technologie - Overzicht van de ter beschikking staande technieken, april 1996
- [2] Gegevens verkregen via website van Eifeler (www.eifeler.com)
- [3] Verein Deutscher Ingenieure, Kohlenstoffsichten - Grundlagen, Schichttypen und Eigenschaften, VDI 2840, 2004
- [4] E. Santner, D. Klaffke, G. Meier zu Köcker, Comprehensive tribological characterization of thin TiN-based coatings, Wear, 190 (1995) 204-211
- [5] M. van Stappen, Oppervlakteveredeling van spuitgietgereedschap door PVD, CVD en ionenimplantatie (deel I), De Constructeur 7, juli 1993, 7-19
- [6] E. Santner, D. Klaffke, G. Meier zu Köcker, Comprehensive tribological characterization of thin TiN-based coatings, Wear, 190 (1995) 204-211
- [7] S. Hogmark, S. Jacobson, M. Larsson, Design and evaluation of tribological coatings, Wear, 246 (2000) 20-33
- [8] W. Grzesik, The influence of thin hard coatings on frictional behaviour in the orthogonal cutting process, Tribology International, 33 (2000) 131-140
- [9] C.Y.H. Lim, S.C. Lim, K.S. Lee, The performance of TiN-coated high speed steel tool inserts in turning, Tribology International, 32 (1999) 393-398
- [10] M. Stoiber, M. Panzenböck, C. Mitterer, C. Lugmair, Fatigue properties of Ti-based hard coatings deposited onto tool steels, Surface and Coatings Technology, 142-144 (2001) 117-124
- [11] H. Jehn, G. Reinert, N. Siegel (Eds.), DIN Fachbericht 39, Beuth Verlag, Berlin, 1993
- [12] M. van Stappen, Oppervlakteveredeling van spuitgietgereedschap door PVD, CVD en ionenimplantatie (deel II), De Constructeur 8, augustus 1993, 32-37
- [13] S.H. Yao, Y.L. Su, The tribological potential of CrN and Cr(C,N) deposited by multi-arc PVD process, Wear, 212 (1997) 85-94
- [14] A. Grill, Diamond-like carbon: state of the art, Diamond and Related Materials, 8 (1999) 428-434
- [15] C. Strödl, G.J. van der Kolk, T. Hurkmans, W. Fleischer, T. Trinh, N.M. Carvalho, J.Th.M. de Hosson, Properties and characterization of multilayers of carbides and diamond-like carbon, Surface and Coatings Technology, 142-144 (2001) 707-713
- [16] Verein Deutscher Ingenieure, Qualitätssicherung bei der PVD- und CVD-Hartstoffbeschichtungen - Eigenschaftsprofile und Anwendungsgebiete von Hartstoffbeschichtungen, VDI 3824, Blatt 1, 2002
- [17] J.A.J. Oosterling, Coatings op verspanende gereedschappen - State of the art en nieuwe ontwikkelingen; Presentatie tijdens PATO cursus 2002, TNO Industrie, Eindhoven
- [18] Verein Deutscher Ingenieure, Qualitätssicherung bei der PVD- und CVD-Hartstoffbeschichtungen - Anforderungen an zu beschichtende Werkzeuge und Bauteile, VDI 3824, Blatt 2, 1997
- [19] Verein Deutscher Ingenieure, Qualitätssicherung bei der PVD- und CVD-Hartstoffbeschichtungen - Fertigungsabläufe und -tätigkeiten, VDI 3824, Blatt 3, 1999
- [20] Verein Deutscher Ingenieure, Qualitätssicherung bei der PVD- und CVD-Hartstoffbeschichtungen - Prüfplanung für Hartstoffsichten, VDI 3824, Blatt 4, 2001
- [21] T. van der Klis, Vademecum Oppervlaktetechnieken Metalen, 6e Uitgave, Nieuwegein, 2002

Bronvermelding

Hieronder vindt u de bronnen van een aantal figuren die in deze publicatie zijn gebruikt:

figuur 1, 4, 9, 10a	(Firma Balzers)
figuur 2, 3, 10c	(IonBond Netherlands BV)
figuur 10b	(Firma Eifeler)
figuur 5	(Firma CZL, Tilburg)
figuur 6	(Firma Stabilus)
figuur 7	(Firma Axa)

tabel 6 Indeling van koolstoflagen [3]

Koolstoflagen															
Aanduiding (engelse naam)	Plasma- polymeer lagen (plasma polymer films)	Amorfe Koolstoflagen (amorphous carbon films, diamond-like-carbon (DLC) films)					Kristallijne koolstoflagen (crystalline carbon films)								
		(amorphous carbon films, diamond-like-carbon (DLC) films)					Diamantlagen (diamond films)			Grafietlagen (graphite films)					
Dunne laag/ dikke laag	dunne laag	dunne laag													
Dotering		waterstofvrij		waterstofhoudend									dikke laag (vrijstaand)	dunne laag	
Additief							gemodifi- ceerd met metaal	gemodifi- ceerd met metaal	gemodifi- ceerd met niet-metaal	ongedoteerd			gedoteerd	onge- doteerd	onge- doteerd
Kristalgrrootte aan de aangroei										1-500 nm nano- kristallijn	0,5-10 µm micro- kristallijn	0,1-5 µm	5 µm tot) 80-500 µm	80-500 µm	
Overwegende C-C binding	sp ² of sp ³ lineaire binding	sp ³	sp ²	sp ² of sp ³	sp ³	sp ²	sp ²	sp ²	sp ²	sp ³	sp ³	sp ³	sp ³	sp ³	sp ²
Aanduiding	plasma- polymeerlaag	waterstof- vrije amorf koolstof- laag	waterstof- vrije amorf koolstof- laag	tetrae- drische waterstof- vrije amorf koolstof- laag	tetrae- drische waterstof- houdende amorf koolstof- laag	waterstof- houdende amorf koolstof- laag	metaal- houdende waterstof- houdende amorf koolstof- laag	gemodifi- ceerde waterstof- houdende amorf koolstof- laag	gemodifi- ceerde waterstof- houdende amorf koolstof- laag	Nano- kristallijne CVD- diamant- laag	Micro- kristallijne CVD- diamant- laag	gedoteerde CVD- diamant- laag	CVD- diamant	gedoteerd CVD- diamant	grafietlaag
Aanbevolen afkorting		a-C	ta-C	a-C:H	ta-C:H	a-C:H:Me (Me = W, Ti...)	a-C:H:Me (X = Si, O, N, F, B...)	DLC	DLC	PCD, PD, NCD	PCD, PD	PCD, PD	diamant- keramiek	diamant- keramiek	
Afgeraden aanduiding		DLC, grafiet- achtige koolstof	DLC, i-C diamant, amorf diamant	DLC	DLC	Me-DLC, DLC	DLC	Tetrahedra I Hydrogen free amorphous carbon film	Hydro- genated amorphous carbon film	Tetrahedra I hydro- genated amorphous carbon film	Metal con- taining hy- drogenated amorphous carbon film	Modified hydro- genated amorphous carbon film			
Engelse aanduiding	Plasma- polymer film	Hydrogen free amorphous carbon film	Tetrahedra I Hydrogen free amorphous carbon film	Metal con- taining hy- drogenated amorphous carbon film	Hydro- genated amorphous carbon film	Tetrahedra I hydro- genated amorphous carbon film	Metal con- taining hy- drogenated amorphous carbon film	Modified hydro- genated amorphous carbon film	Doped CVD Diamond film	Micro- crystalline CVD diamond film	Doped CVD diamond film	CVD diamond	Doped CVD diamond	Graphite film	
Aanbreng- proces	PA-CVD	PVD	PVD	PVD	PA-CVD	PVD, PA-VD	PVD + PA-CVD, PA-CVD	PVD + PA-CVD, PA-CVD	PVD + PA-CVD, PA-CVD	Geacti- veerd CVD	Geacti- veerd CVD	Geacti- veerd CVD	Geacti- veerd CVD	Geacti- veerd CVD	CVD, PVD

tabel 7 Koolstoflaageigenschappen [3]

Aanduiding	Plasma-polymer-laag	waterstof-vrije amorfe koolstoflaag	tetraedrische waterstof-vrije amorfe koolstoflaag	metaal-houdende waterstof-vrije amorfe koolstoflaag	waterstof-houdende amorfe koolstoflaag	tetraedrische waterstof-houdende amorfe koolstoflaag	metaal-houdende waterstof-houdende amorfe koolstoflaag	gemodificeerde waterstof-houdende amorfe koolstoflaag	nano-kristallijne CVD-diamant-laag	micro-kristallijne CVD-diamant-laag	gedoteerde CVD-diamant-laag	CVD-diamant	gedoteerd CVD-diamant	graafiet-laag
Aanbevolen afkorting	—	a-C	ta-C	a-C:Me	a-C:H	a-C:HMe (Me=W,Ti...)	a-C:H:X (X=Si, O, N, F, B...)	—	—	—	—	—	—	—
Adhesieve slijtagebestendigheid	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
Abrasieve slijtagebestendigheid	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
Bestendigheid tegen oppervlakte aantasting	++	++	++	+++	++	++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
Corrosiebestendigheid	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
Wrijvingsverlaging	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
Bevochtigbaarheid	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
Bijzondere functies		decoratie	decoratie	decoratie	diffusie-barrière, decoratie	decoratie	decoratie	decoratie	decoratie	decoratie	elektro-chemische overspanning	warmte-geleiding transparantie (IR, VIS, UV, röntgen), decoratie	elektrische geleiding, decoratie	
Typische laagdikte (uitzonderingen)		1-5 µm	(1 nm tot) 1-3 µm	1-5 µm	1-5 µm	1-5 µm	1-5 µm (1 mm tot 15 µm)	1-5 µm	1-20 µm (60 nm tot 40 µm)	4-20 µm (tot 40 µm)	0,1-10 µm	(20 µm tot) 0,3-2 mm	0,3-2 mm	
Ruwheid laag Ra					0,2-5 nm				0,01-0,05 µm	0,05-0,3 µm	0,01-0,1 µm	0,005-0,05 µm	translucent blauw tot zwart, geel, bruin	
Kleur		zwart	zwartgrijs	zwartgrijs	zwartgrijs donkerbruin	zwartgrijs donkerbruin	zwartgrijs	transparant, zwartgrijs tot geelbruin	grijs	grijs	grijs	translucent tot zwart		
Hoeveelheid dotering additief:														
Waterstof in atoom%	> 40		0-3		3-40	3-30	3-40	3-40			< 1			
Overige in atoom%				metaal: 5-30			metaal: 3-30	1-20			B: 0,1-0,6 N: tot 0,1			
Max. temperatuurbestendigheid (°C)		450	500	400-600	400	500	350-500	350-500		650	700	650	700	
Warmtegeleiding bij kamertemperatuur (W/mK)					0,1-10					500-2000		1000-2200	1000-1100	
Thermische uitzettingscoëfficiënt					2x10 ⁻⁶ tot 3x10 ⁻⁶ (gemiddelde voor temp. 25-150 °C)					0,8x10 ⁻⁶ (kamertemperatuur) tot 6,8x10 ⁻⁶ (500 °C)				
Hardheid (GPa)		10-29	40-90	8-27	20-40	≤ 50	1-20	7-40			60-100			
Elasticiteitsmodulus (GPa)		100-290	200-820	100-200	25-400	≤ 300	150-200	1-400		800-1100		1000-1100		
Specifieke elektrische weerstand (Ωm)		10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹⁰	10 ⁻² -10	10 ⁴ -10 ⁸	10 ⁴ -10 ⁸	10 ⁻² -10	> 10 ⁴	10 ⁹ -10 ¹³	10 ⁹ -10 ¹³	10 ⁻² -10 ³	10 ⁹ -10 ¹³	10 ⁻² -10 ³	
N.B. Meer plussen betekend beter														

BIJLAGE II

Voorbeeld van een formulier dat wordt ingevuld door de opdrachtgever voor de jobcoater

Bestelformulier voor harde dunne coatings

Uw referentie

Firma

Verantwoordelijke

Adres

PC/Plaats

Telefoon

Fax

E-mail

Opdrachtgegevens:

Pos. Nr.	Gereedschap	Aantal	Afmetingen	Materiaal (werkstofnr.)	Coating

Voor meer posities, gelieve bijkomende formulieren mee te sturen.

Technische gegevens:

Gelieve een schets van het gereedschap te maken of een tekening ervan bij te voegen.

Samengesteld onderdeel ☐ staal / staal
☐ staal / hardmetaal
☐ hardmetaal / hardmetaal

Microstralen toegelaten ☐ ja ☐ neen

Thermische behandeling ☐ Zoutbad
☐ Beschermgas
☐ Vacuüm

Ontlaattoemperatuur °C

Aantal keer ontlaten

Hardheid

Voorafgaandelijke oppervlaktebehandeling

Vacuümbestendig soldeermiddel - samenstelling

Gepolijst oppervlak ☐ ja ☐ neen

Te behandelen oppervlakken

Oppervlakken die niet mogen behandeld worden

Datum:

Handtekening:



BIJLAGE III

Inspectiemethoden

De inspectiemethoden voor dunne harde coatings zijn onder te verdelen in:

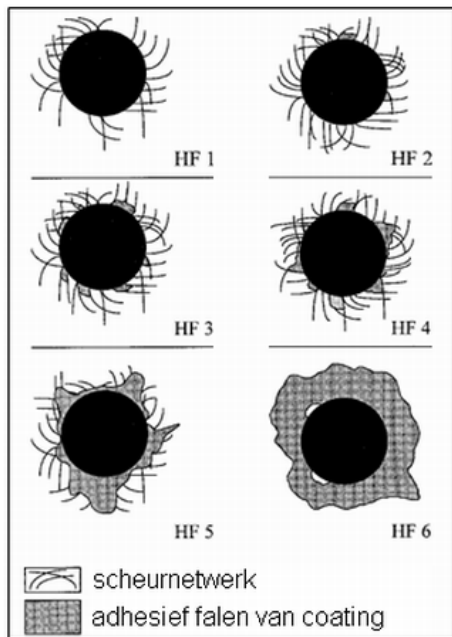
1. Visuele inspectie.
 2. Bepaling van de coatinglaagdikte.
 3. Bepaling van de hardheid.
 4. Bepaling van de hechting tussen coating en basismateriaal.
 5. Bepaling van de functionele eigenschappen van de coating/basismateriaal samenstelling:
 - a. slijtvastheid;
 - b. corrosievastheid.
- ad 1. **Visuele inspectie** omvat het aandachtig bestuderen van de functionele oppervlakken om ongecoate plekken of schilferen (*chipping*) te ontdekken wat wijst op hechtingsproblemen.
- ad 2. **Bepaling van de coatinglaagdikte** staat o.a. beschreven in de normen EN ISO 2064, PN-EN ISO 1463 en ISO 3882; de hierna genoemde inspectiemethoden ter bepaling van de coatinglaagdikten zijn breed geaccepteerd door PVD en CVD jobcoaters:
- **optische microscopie metingen aan een kogelrond geslepen segment (DIN V ENV 1071-2)**
De harde coating wordt bolrond geslepen tot aan het basismateriaal met behulp van een stalen kogel (diameter tussen 10 en 20 mm). Voor een coatingdikte tot 10 µm wordt diamantpasta als abrasief gebruikt (gemiddelde korrelgrootte 0,5 tot 1 µm). Opgelet moet worden dat het oppervlak dat moet worden geïnspecteerd in niet meer dan 1 richting is gebogen, omdat anders de bepaling van de coatingdikte onmogelijk is (tenzij de kromming van het oppervlak bekend is). De nauwkeurigheid wordt bepaald door het precies slijpen van het bolronde segment en de calibratie en resolutie van de optische microscoop. Op gereedschappen kunnen nauwkeurigheden van 0,3 tot 0,5 µm worden behaald, op gepolijste oppervlakken 0,1 µm. In geval van een ruw oppervlak moet een gemiddelde waarde worden gekozen van de laagdikte. De bepaling van de laagdikte levert ook beperkte informatie op over de coatingstructuur, coating hechting, grensvlak, basismateriaal en weerstand tegen abrasieve slijtage.
 - **optische microscopie metingen aan een metallografisch geprepareerde doorsnede (PN-EN ISO 1463)**
Hier gelden dezelfde opmerkingen als bij de metingen aan een bolrond segment. Deze methode is aanzienlijk veeleisender en om die reden wordt het niet vaak toegepast in een productieomgeving.
 - **röntgenfluorescentie (XRF) en beta-terugstrooiing (DIN 50987, ISO 3497 en DIN EN ISO 3543)**
Tijdens röntgenfluorescentie wordt het oppervlak bestraald met röntgenstraling en de intensiteit van de röntgenfluorescentielijnen is een maat voor de laagdikte. Tijdens beta-terugstrooiing wordt het oppervlak bestraald met elektronen (beta-straling) afkomstig van een radioactieve bron en de intensiteit van de terugverstrooide elektronen is een maat voor de laagdikte. Beide zijn niet-destructieve methoden en een goede calibratie is noodzakelijk.
 - Opgemerkt dient te worden dat voor PVD of CVD coatings geen magnetische inductie methoden of *eddy current* methoden worden aanbevolen voor praktische kwaliteitsborging.
- ad 3. Aan de **bepaling van de hardheid** van dunne lagen worden speciale eisen gesteld. Zo mag de pene-

tratiediepte tijdens de hardheidsmeting niet groter zijn dan 10% van de coatinglaagdikte, dus voor hardheidsmetingen met een massa van minder dan 100 g (zoals de algemeen gangbare hardheidstest HV 0,05), is het de gewoonte om speciale apparatuur te gebruiken die massa's van minder dan 10 g toepassen (ultra-microhardheidstest). Om de indrukken in de coating te kunnen zien, moet de oppervlakteruwheid laag zijn, d.i. $R_z < 1 \mu\text{m}$, wat alleen kan worden bereikt via nauwkeurig polijsten. Op deze manier kunnen hardheden van coatinglaagdikten groter dan 3 µm worden gemeten. Indien wordt gemeten met standaard hardheidsmeters, wordt de hardheid van de composiet (coating + basismateriaal) gemeten en mag die worden vergeleken met de hardheid van andere composieten. Bekende hardheden zijn die volgens Vickers en Knoop (DIN EN ISO 6507-1, DIN ISO 4516 en ISO 4545).

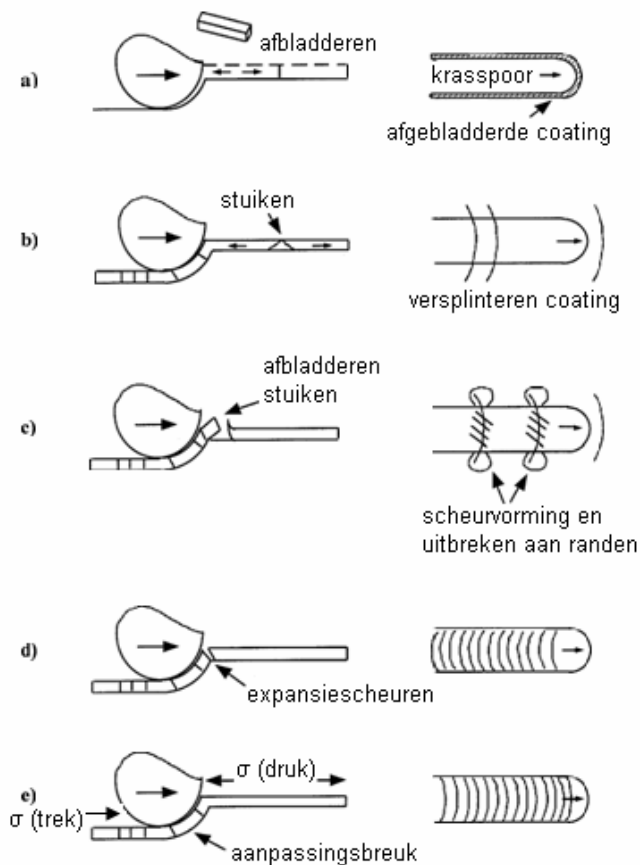
- ad 4. **Bepaling van de hechting tussen coating en basismateriaal** - In principe is het onmogelijk de adhesie krachten tussen coating en basismateriaal te meten; bij alle methoden wordt het resultaat beïnvloed door alle eigenschappen van de samenstelling (hardheid, E-modulus, interne spanning, breuktaaiheid, laagdikte, enz. en ook de feitelijke binding tussen coating en basismateriaal). Bovendien beïnvloeden structuur en oppervlakteruwheid vaak het meetresultaat, zodat kan worden gesteld dat de meetmethoden alleen toepasbaar zijn op vergelijkende beoordelingen van soortgelijke coating/basismateriaal systemen. Ze zijn alleen geschikt voor het testen van de kwaliteit van identieke coatings met dezelfde dikte op hetzelfde basismateriaal. Er zijn twee algemeen bekende methoden om de hechting tussen coating en basismateriaal te meten:
- a) **adhesietest d.m.v. de Rockwell C test (VDI 3198)** - Hierbij wordt de afmeting en het type van de coating die is afgeschilferd rondom een indrukking in de coating/basismateriaal composiet (na een hardheidsmeting volgens Rockwell C, EN 10109-1) beoordeeld waarbij gebruik wordt gemaakt van een aantal referentieplaatjes (figuur 21); de methode is snel en eenvoudig en geschikt voor vaststellen van een kwalitatieve rangorde binnen een coating/basismateriaal systeem; geschikte basismaterialen hebben een hardheid van 55-70 HRC en vergelijkingen mogen alleen worden gemaakt tussen identieke materialen met dezelfde hardheid; de toepassing van deze methode voor CVD coatings is beperkt.
 - b) **adhesietest d.m.v. de oppervlakte krastest (DIN V ENV 1071-3)** - Een Rockwell C diamant wordt over een gecoat oppervlak getrokken met toenemende belasting (1-150 N); na de test wordt de kras gemeten m.b.v. een optische microscoop of SEM en het type en de afmeting van de beschadiging van de coating wordt beoordeeld als functie van de belasting en wordt vergeleken met referentieplaatjes (figuur 22); deze methode is tijdrovend en geschikt om een rangorde binnen één coating/basismateriaal systeem te bepalen; geschikte basismaterialen hebben een hardheid tussen 40-70 HRC; problemen bij deze methode zijn onvoldoende reproduceerbaarheid vanwege slijtage aan het testmateriaal (de Rockwell C diamant) en coating- of basismateriaaloverdracht naar het testmateriaal, de oppervlaktekwaliteit en oriëntatie van de kras beïnvloeden het resultaat en geen calibratieprocedures voor apparatuur en testmateriaal zijn gespecificeerd; van-

wege de complexe invloed van parameters en de grote spreiding in resultaten moeten de kritische belastingen zorgvuldig worden beoordeeld en moeten de testmaterialen vooraf grondig worden geïnspecteerd.

- ad 5. **bepaling van de functionele eigenschappen van de coating/basismateriaal composiet** - Testen van de functionele eigenschappen zijn geen algemeen gangbare methoden om de kwaliteitsborging te garanderen vanwege hun beperkte relevantie, de meestal lange testduur en de relatief kostbare testapparatuur; de bekendste testmethoden voor het bepalen van de functionele eigenschappen van de coating/basismateriaal composieten zijn de slijtagetesten en de corrosietesten.



figuur 22 Hechtingscategorieën volgens richtlijn VDI 3198 [20]



figuur 23 Faalmoden tijdens oppervlakte krastest volgens DIN 1071-3 [20]

Auteur

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

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

Daarnaast hebben de volgende organisaties hun bijdrage geleverd aan de totstandkoming van deze publicatie: Bouwen met Staal (BmS), Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN), IOP Oppervlaktetechnologie, Nederlands Corrosie Centrum (NCC), TNO Industrie & Techniek, Vereniging van Oppervlaktetechnieken voor materialen (VOM)

De auteur, Jan-Paul Krugers (TNO Industrie & Techniek) werd ondersteund door een werkgroep bestaande uit: J. van de Put (Syntens), P.P.J. Ramaekers (Rasceur Industrial Innovations), H. Peeters (Balzers), R. Didden (CZL), G. Vaessen (GVA) en P. Boers (FME-CWM).

Technische informatie:

Voor technisch inhoudelijke informatie over de in deze voorlichtingspublicatie behandelde onderwerpen kunt u zich richten tot de auteur Jan-Paul Krugers (tel.: 040-2650447, e-mail: jan-paul.krugers@tno.nl).

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

Vereniging FME-CWM / Industrieel Technologie Centrum (ITC)

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

Nederlands Instituut voor Lastechniek (NIL)

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

© Vereniging FME-CWM/september 2005 - 01

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

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

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



Netherlands Institute
for Metals Research



Federatie
dunne plaat



SenterNovem



FME CWM

