

Slijtage mechanisme en slijtage van thermisch gespoten lagen

E.W. Schuring

6 maart 2015
ECN-L--15-010



Slijtage mechanisme en slijtage van thermisch gespoten lagen

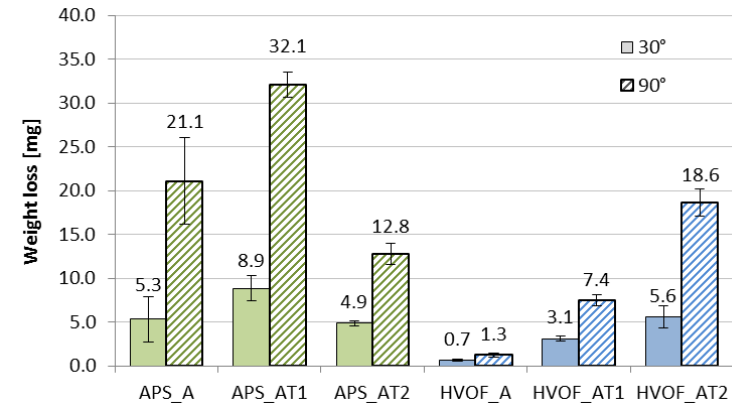
Toepassingsmogelijkheden voor thermisch gespoten lagen

Sulzer Pompen Standdaarbuiten
6 maart 2015

Erik Schuring
schuring@ecn.nl

Inhoud

- Wat is slijtage/tribologie
- Indeling mechanismen
- Mechanismen en Invloedsfactoren
- Karakteriseren
- Wat is er tegen te doen
- Oplossingen met thermisch gespoten lagen
- Conclusies/Samenvatting



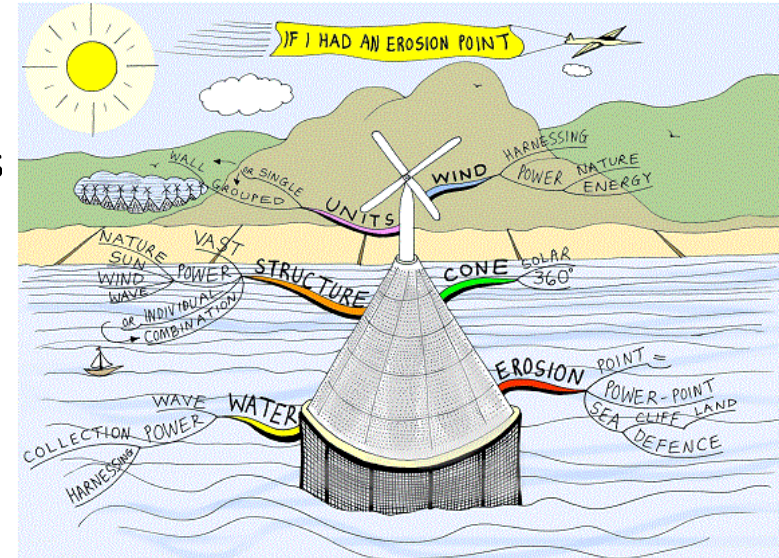
Verwachtingen

Niet

- Kant en klare recepten voor DE slijtvaste coating, want die bestaat niet
- Kant en klare recepten per slijtage mechanisme

Wel

- Begrip over slijtage en de belangrijkste parameters
- Indicatie voor denkrichtingen hoe aan te pakken
- Methoden voor validatie
- Methoden voor identificatie



Wat is slijtage en Wat is Tribologie



Slijtage:

- Slijtage is een langzame en ongewenste verandering van afmetingen en gedaante van het oppervlak van een voorwerp tijdens gebruik
- Als gevolg van een glijdende, stotende of rollende aanraking met een tegenmateriaal
- Eventueel gepaard gaande met fysische, chemische of elektrochemische processen



Tribologie:

De wetenschap die zich bezighoudt met de bestudering van de verschijnselen die samenhangen met wrijving, smering en slijtage.

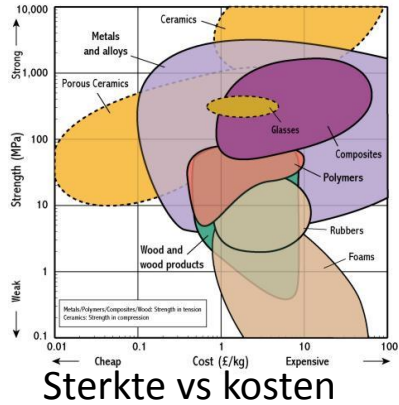


Slijtage van het kraakbeen



Wat is slijtage

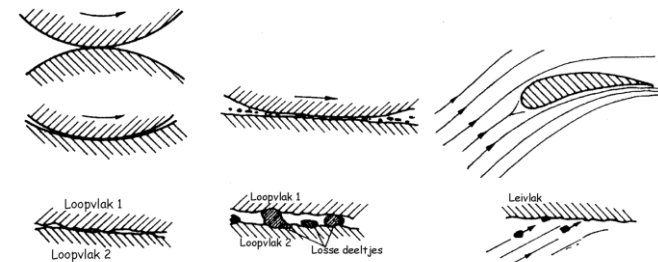
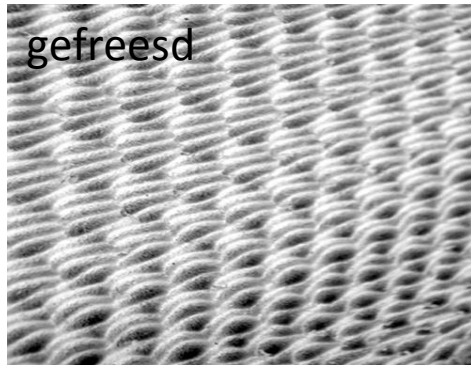
Slijtage is een **SYSTEEM**-eigenschap aan het oppervlak bepaald door:



Materiaaleigenschappen
 +
 Oppervlakte condities
 (Topografie)
 +
 Milieu
 +
 Belastingcondities



opgelast



Slijtage is een oppervlakte functionaliteit

Deklaag keuze als:

- de gevraagde functionaliteit goed en juist omschreven moet zijn.
 - goed omschreven moet zijn wat de gebruikscondities zijn.
 - er duidelijkheid moet bestaan over de verwachte levensduur/gebruikstermijn.
-

Functionele eigenschappen
basismateriaal

Functionele eigenschappen
oppervlak

Mechanische eigenschappen
Lasbaarheid
Vervormbaarheid

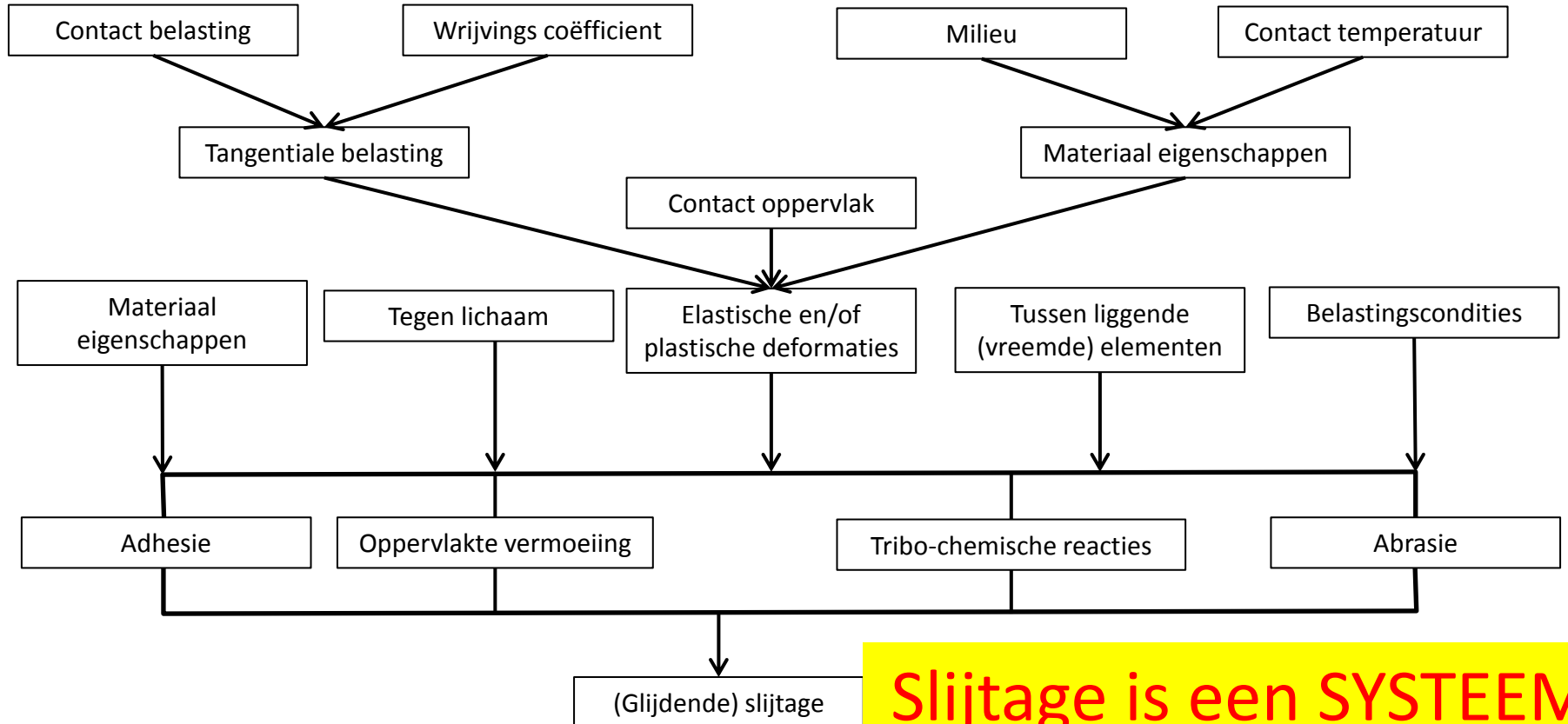
Vermoeiing
Reparatie
Elektrische isolatie/geleiding
Thermische isolatie/geleiding

Toepassingsgebied
deklagen

Slijtvastheid
Corrosievastheid
Esthetica

Wat is slijtage

Beïnvloedende factoren



Slijtage is een SYSTEEM

Slijtage mechanismen

Deeltjes of vloeistof

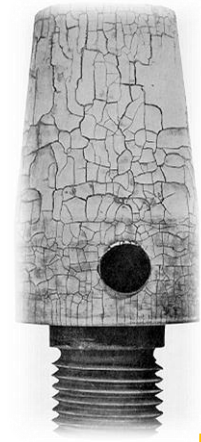
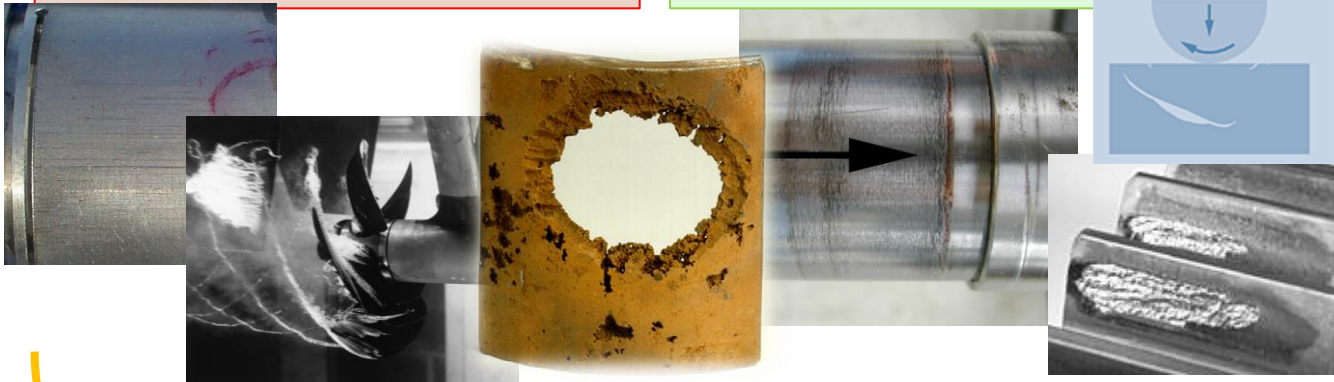
- Abrasief
- Erosief
- Cavitatie
- Impact/impingement
- Erosie in een slurrie

Rollen, glijden of impact

- Adhesief
- Schaviel
- Fretting
- Rollend
- Impact

Chemische invloeden

- Corrosief
- Oxidatie
- Thermisch



Combinaties

Overzicht Slijtage mechanismen vs parameters

| Slijtage mechanisme | Materiaal parameter | | | | | | | | Oppervlak | | | | Milieu | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|---------------------------------------|-----------|----------|-------------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|-------------------------------------|-------------------------|--------------------|---------|----------------------|---------------|-------------|----------|-----------------|-----------|---------------------|------------|-------------|----------------------|-----------------------------|---------|
| | Hardheid (basismateriaal vs deeltjes) | E-modulus | Rekgrens | Kerftaaiheid | Koudversteving | Restspanningen | Smeltemperatuur | Microstructuur | Oxidehuid (als corrosiebescherming) | Chemische samenstelling | Wrijvingsweerstand | Ruwheid | Materiaalcombinaties | Type abrasief | Temperatuur | Snelheid | Hoek van inslag | Belasting | Belasting amplitude | Frequentie | Vochtigheid | Corrosieve invloeden | Zuurstof partieldruk Vacuum | Smering |
| Abrasief | | | | m.n. bij keramiek | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Erosief | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Cavitatie | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Impact/ Impingement | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Erosie in een slurry | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Adhesief | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Schavief | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Fretting | | | | | | | | | | afh van mat cominatie | | | | | | | | | | | | | | |
| Rollend | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

NOTEN:

Wat is slijtage

- Slijtage vindt plaats aan het (sub)oppervlak → oppervlakte modificatie
- Slijtagebestendigheid \neq Hardheid?

Door veranderingen aan het oppervlak uit te voeren wordt het slijtageproces beïnvloed



Deze oppervlakte-beïnvloeding moet afhankelijk van de toegestane slijtage en het slijtageproces een minimale diepte hebben (Oppervlaktevermoeiing)

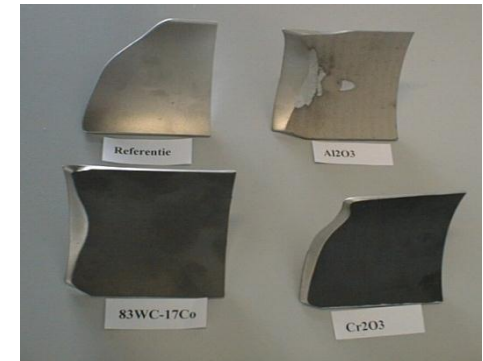
Oppervlaktebeïnvloeding kan zijn:

- Topografie (wrijvingsweerstand)
- Hardheid (bijvoorbeeld oppervlakteharding of deklaag)
- Temperatuur (voorkomen thermische schok)
- Chemisch (voorkomen van concentraties)
- enzovoort

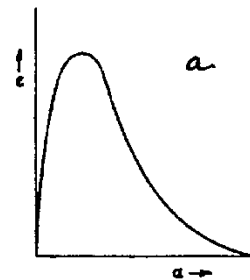
Slijtage – Deeltjes - Erosie

Materiaalkeuze – basismateriaal (voorbeeld erosie)

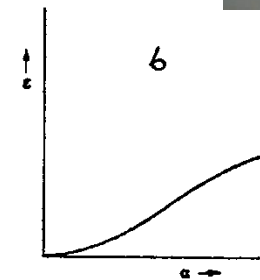
- Hardheid
- Taaiheid
- Kerftaaiheid – weerstand tegen scheurgroei
- Restspanningen
- Microstructuur
- Corrosie/oxidatie bestendigheid
- Chemische bestendigheid
- enzovoort



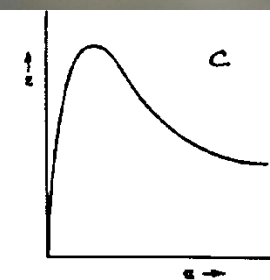
Deeltjes erosie:
invloed inslaghoek vs
basis materiaal



rubber



keramiek en glas

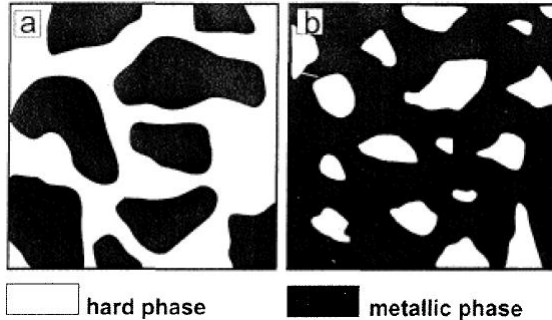


metaal

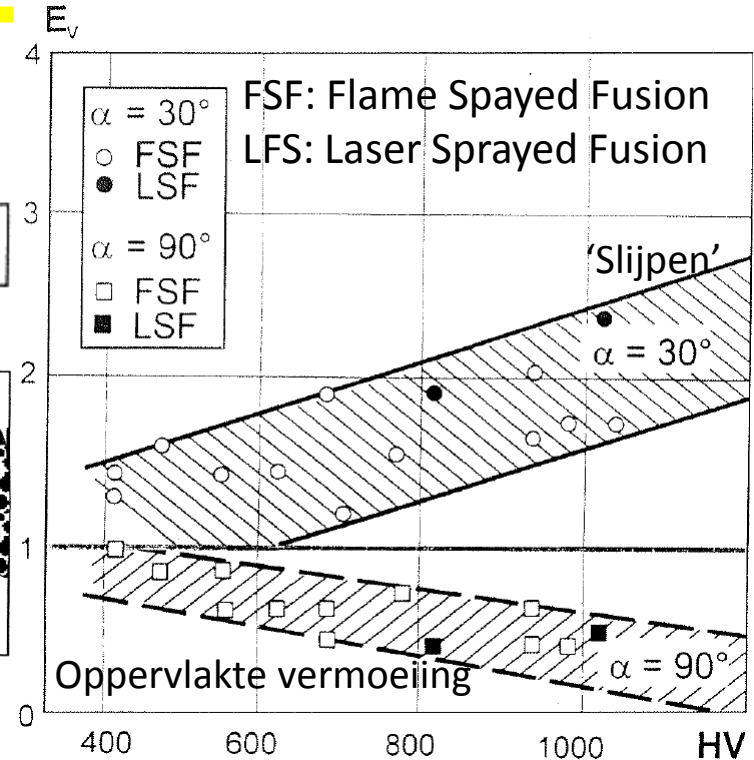
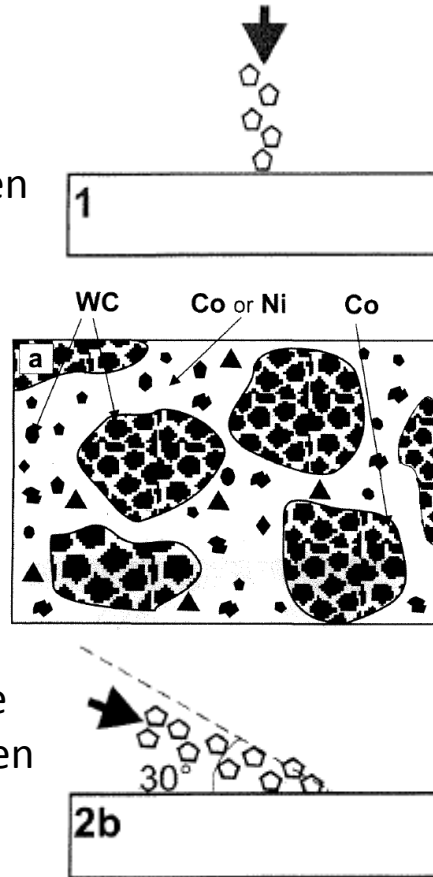
Slijtage – Deeltjes - Erosie

- Voorbeeld voor WC-Co

Metaalmatrix met optimale hardheid + max 50% harde fasen



Matrix harde fase met optimale hardheid + max 50% metaalfasen

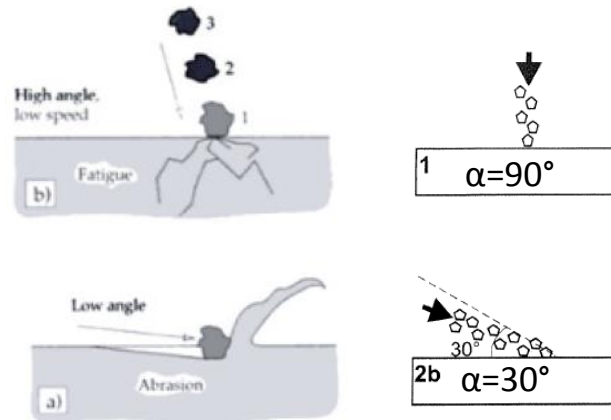


Relatieve bestendigheid tegen erosieve (impact) slijtage gespoten+gefused vs Hardheid, WC-Co typen [JTTEE5-11:517-522]

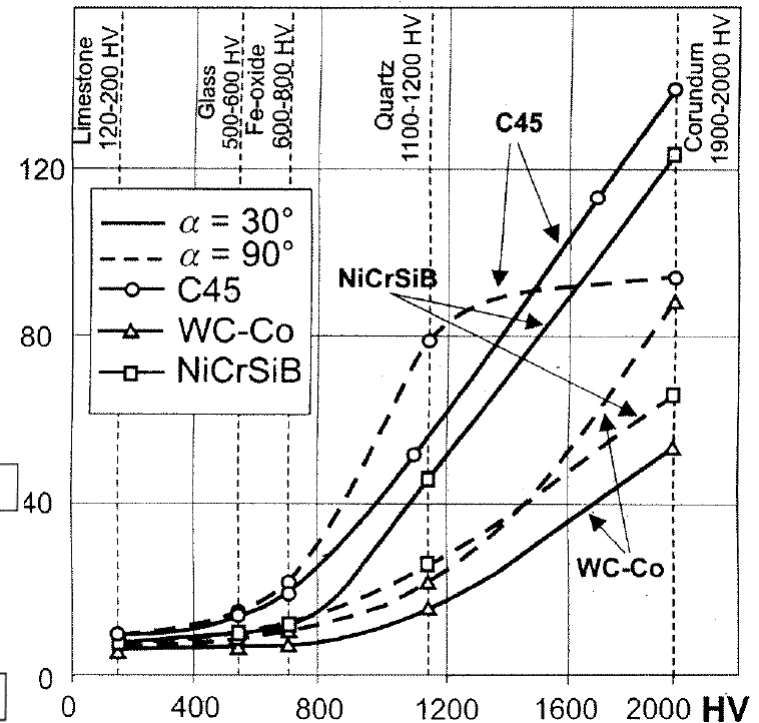
Slijtage – Deeltjes - Abrasie

Relatie deeltjes hardheid-impact hoek-coating hardheid

- $< 30^\circ$: Coating hardheid $>$ hardheid deeltjes
- $> 30^\circ$: Grote invloed hardheid deeltje op slijtage \rightarrow oppervlakte vermoeiings effect



v_v , mm^3/kg



Bron: [JTTEE5-11:517-522]

Slijtage – Deeltjes - Abrasief

Materiaal parameters:

- Hardheid
- Ruwheid/wrijvingsweerstand

| Coating type | Application method | Hardness [VHN] | Porosity [%] | Roughness Ra [μm] | [Rt] | Friction coefficient, μ |
|-----------------------------|--------------------|----------------------------|-------------------------|--------------------------------|------|-----------------------------|
| WC-Ni11P | Spraying/sintering | 860-875 | 0 | 4.1 | 40.7 | |
| WC-10Co-4Cr | HVOF-JP5000 | 1179 \pm 56 | 2.2 \pm 1.0 | | | |
| | HVOF-DJ2700 | 1154 \pm 62 | 5.5 \pm 1.6 | | | |
| | HV-APS-Axiall-III | 1051 \pm 51 | 9 \pm 4 | | | |
| WC-Co + Monitox (Cast Coat) | HVOF | 1500 (monitox top coating) | 0 (monitox top coating) | 0.5 | | 0.4 |

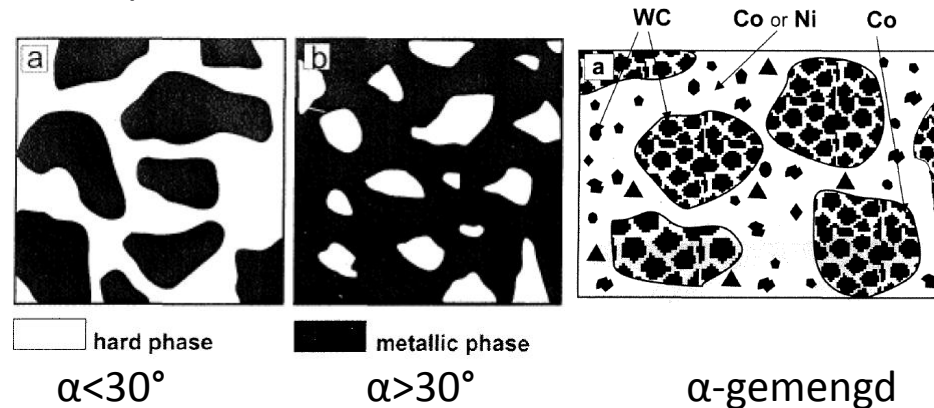
Remark:

Properties depend on spraying parameters and are presented as averages of several experiments
Data recorded from literature.

Voorbeelden hardheidsverschillen WC-x coatings vs TS-systeem

Selectie criteria – Erosie/abrasie

- Minimale porositeit (ca <3%): HV-systemen (bv HVOF, HVAF)
- Optimale hardheid:
 - Kleine impact hoek: coating harder dan deeltjes (maximale hardheid coating)
 - Grote impact hoek: Optimale hardheid, hoeft niet de maximale te zijn
- Structuur:



- Abrasie: Coating hardheid > deeltjes hardheid

Thermisch spuiten vs Erosie/abrasie

- Dichte lagen (Hoge deeltjes snelheden en kleine deeltjes) → HVOF ed
- Hoge hardheden (zo laag mogelijke temperatuur)
- Structuur aanpassen aan Erosie/abrasie parameters
 - Impact hoek, kleine hoek → hoge hardheid, grote hoek → zekere taaheid matrix
 - Deeltjes hardheid
- Spuitpoeder type heeft invloed
- Totale Energie term bij TS geeft indicatie voor de functionele eigenschappen, bv Slijtvastheid (TS-98)
 - Energie term : (Brandstof x Spuitafstand)/Poedertoevoer

Slijtage – Erosie: in de straaltest (TS 98)

- Relatie energie term – Erosie bestendigheid voor WC-CoCr 10-4 (JP5000)

- Gunstig:

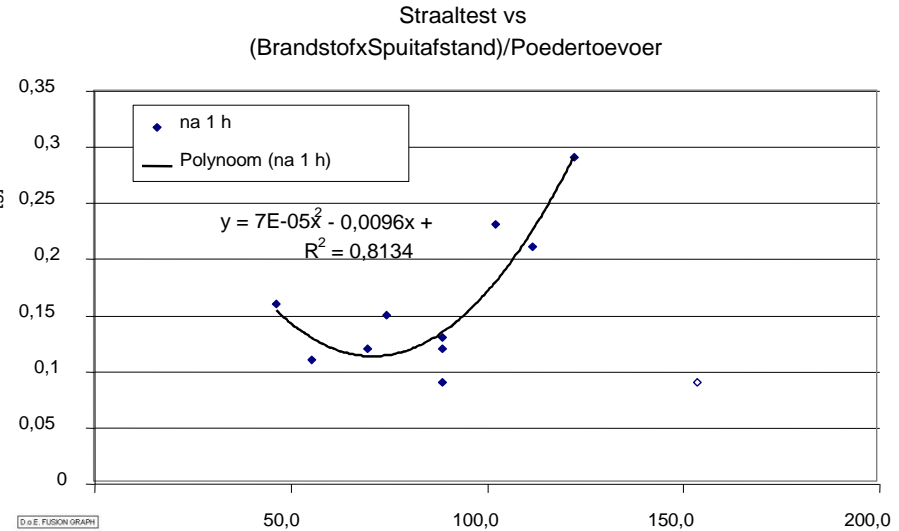
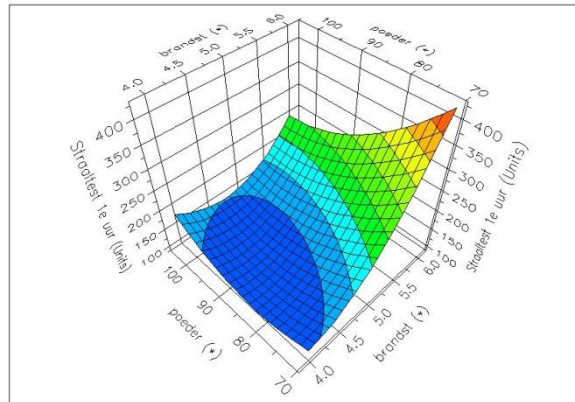
- Laag brandstof (debiet)
- Korte spuitafstand
- Laag poederdepriet



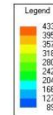
Hoge kin energie en gemidd therm energie

[TS 98: TN-02-091]

Straaltest 1e uur JP5000 Respons Surface (zonder serie 9)



(Brandstof x Spuitafstand)/Poedertoevoer

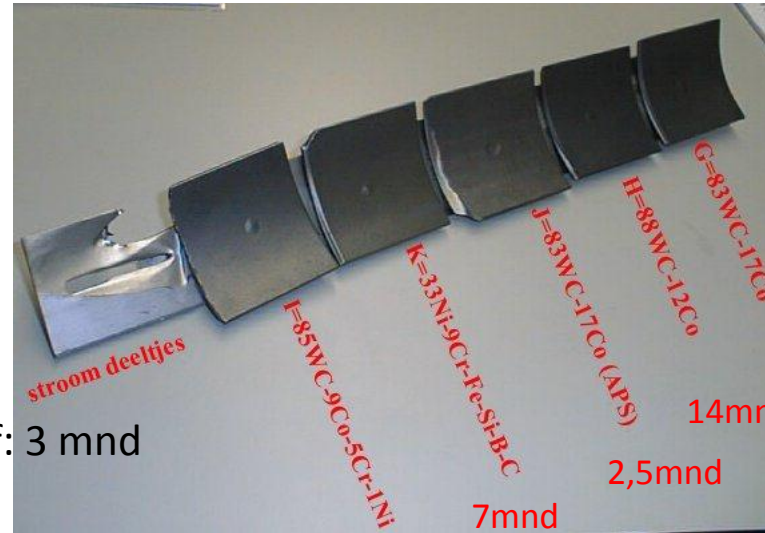


Slijtage – Erosie

Inzet WC-Co coatings: dicht en hoge hardheid

- Gekromde buis
- Erosieve slijtage door houtskooldeeltjes
- Testen met opgespoten plaatjes

HVOF gespoten (APS, JP5000)



Ref: 3 mnd

9mnd

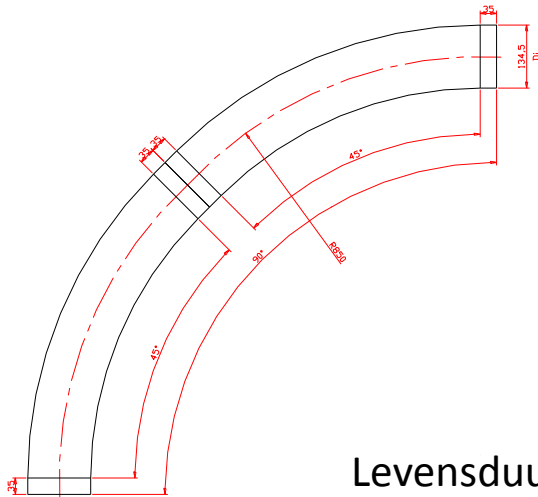
14mnd

2,5mnd

7mnd

17mnd

Levensduur deklaag bij 0,5mm:



Slijtage - Fretting

Voorwaarden:

- Twee oppervlakken voeren ten opzichte van elkaar een relatieve beweging uit.
- De basiselementen van de legering(en) hebben een goede oplosbaarheid in elkaar (kunnen een legering vormen waarbij deze element goed in elkaar oplossen, b.v.: Fe + Cr + Ni).
- Of twee gelijksoortige materialen zijn met elkaar in contact (ook voor kunststoffen).

Remedie:

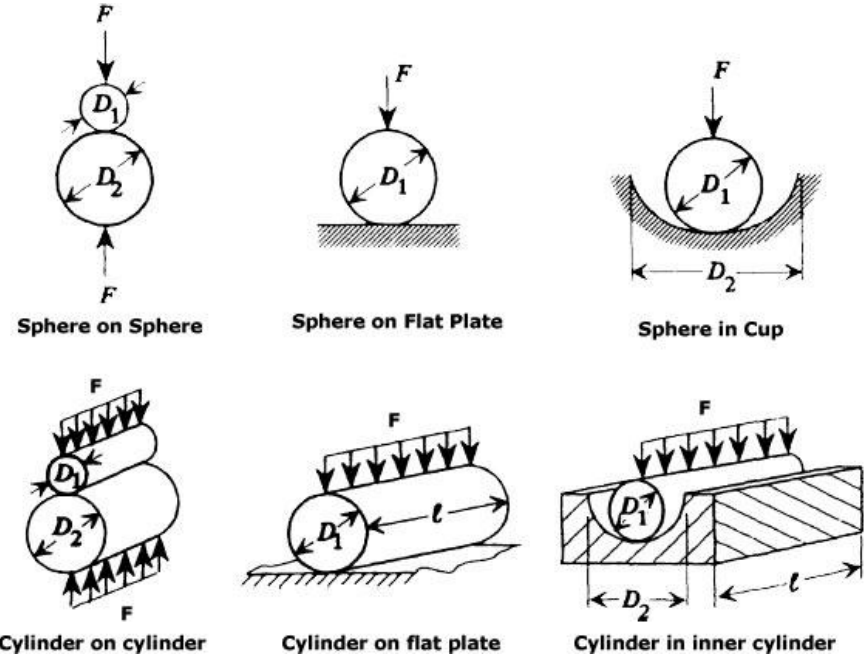
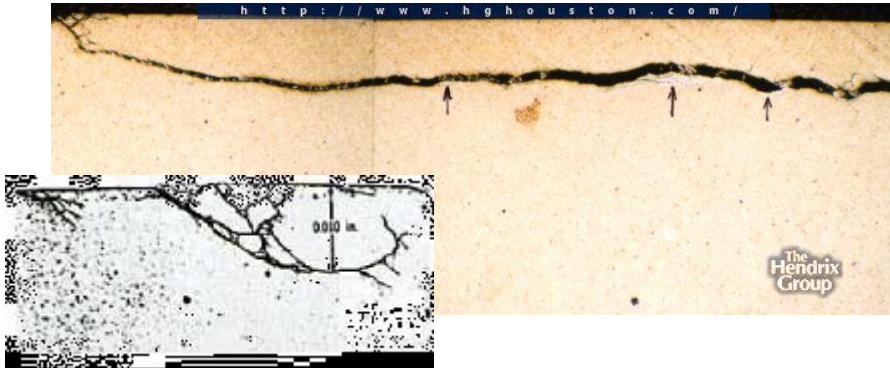
- Beweging voorkomen.
- Andere materiaalcombinatie kiezen of deklaag aanbrengen: TiN (PVD/CVD), kolsteriseren (harden) van een van de oppervlakken.
- Een van de oppervlakken opruwen (let op: Dit kan de vermoeiingseigenschappen negatief beïnvloeden).
- Wrijvingscoëfficiënt aanpassen.

Slijtage – Rollende / glijdende slijtage ECN

Oppervlakte vermoeiing

Hertziaanse (schuif)spanningen:

- Afhankelijk van de kracht en diameter ontstaan de maximale schuifspanningen onder het oppervlak → vermoeiing → scheuren

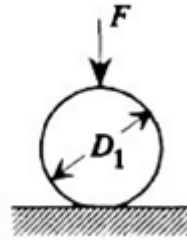
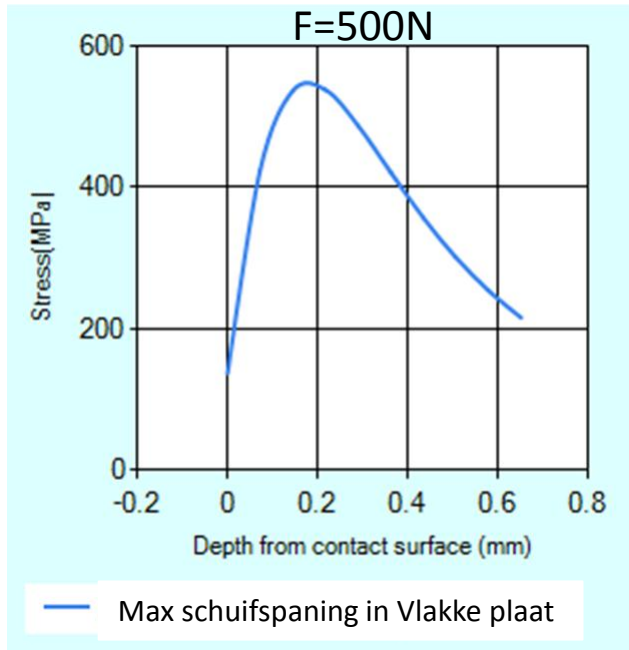


Probleem met TS lagen is de cohesive sterkte in de laag en de adhesive sterkte met het substraat → locatie van de hoogste schuifspanning(en)

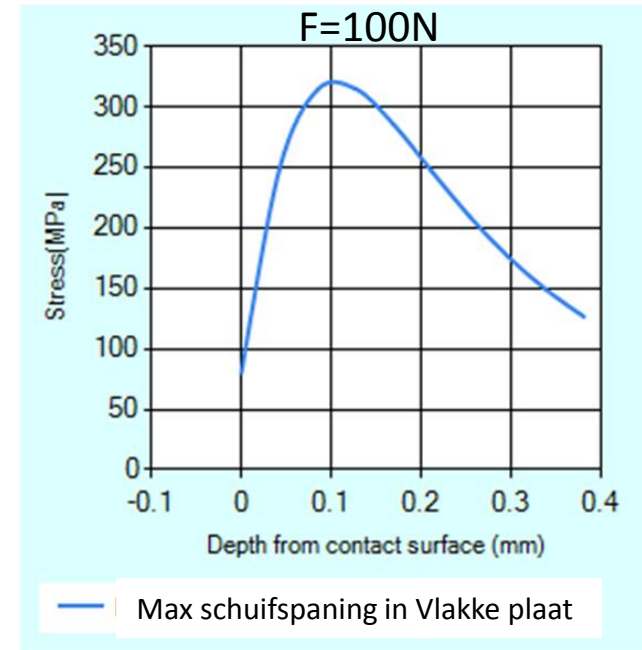
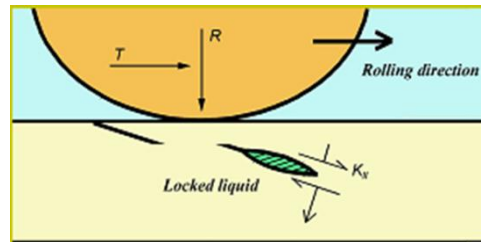
Slijtage – Rollende / glijdende slijtage

Oppervlakte vermoeiing

Diepte van de maximale Hertziaanse schuifspanning varieert met oa belasting.



$D_1 = 10\text{mm}$
 $E = 70\text{GPa}$
Poisson: 0,35



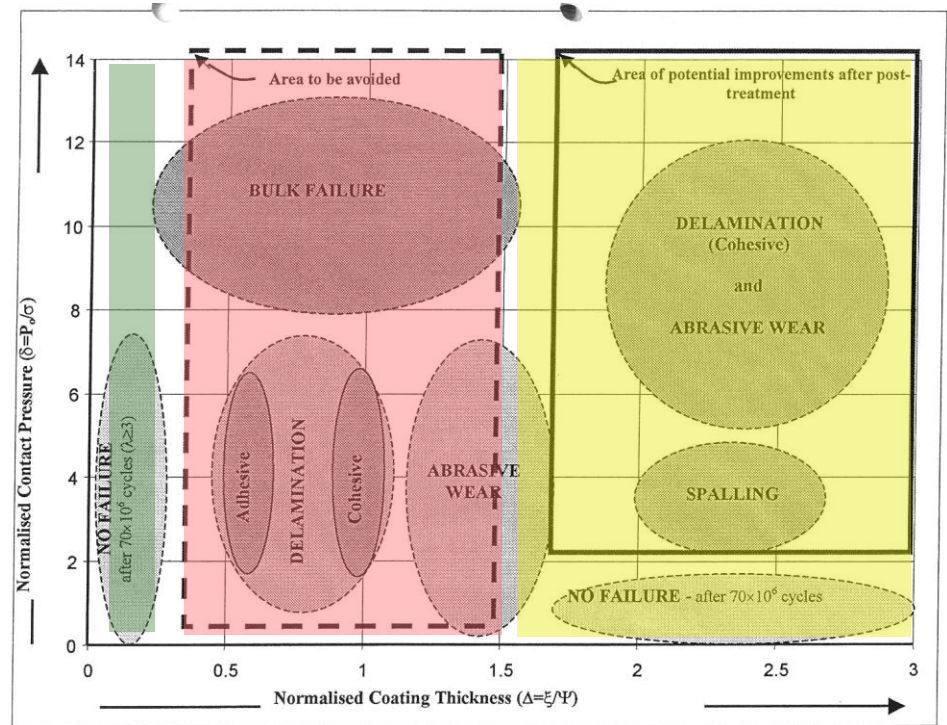
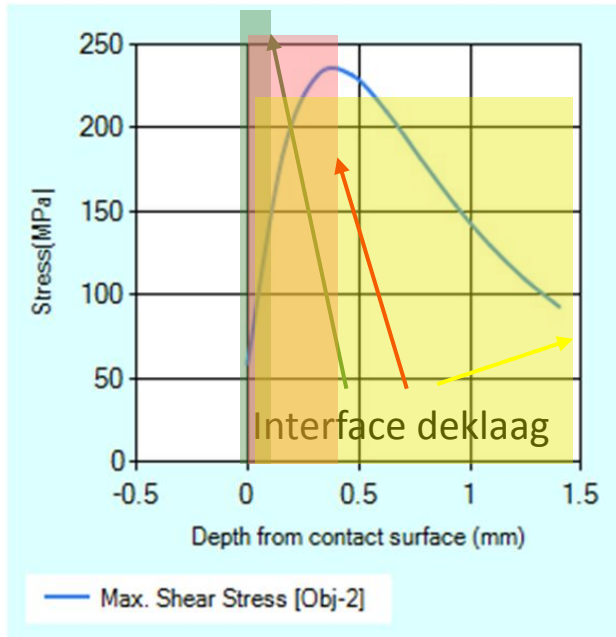
Slijtage – Rollende / glijdende slijtage

Oppervlakte vermoeiing

Hoogste spanning in BM

Hoogste spanning in deklaag

Hoogste spanning op interface



Schadegeval oppervlakte vermoeiing

- Elektrisch draadgespoten, 13% Cr-staal (AISI410-type)+NiAl-hechtlaag op duplex (alloy 255) → relatief lage adhesieve sterkte
- Laagdikte: 0,5mm
- Lagering, met K6-passing (0-passing)
- Drukspanning op de laag, dynamisch tijdens bedrijf → oppervlakte vermoeiing

Keuze voor elektrisch draadspuiten als reparatie is hier een foute keuze geweest in combinatie met de dunne laag

Alternatief: HVOF en dikker of lasercladden



Slijtage – Rollende / glijdende slijtage ECN

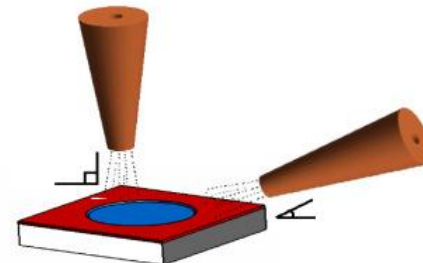
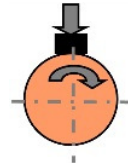
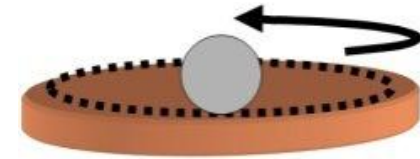
Oppervlakte vermoeiing

Samenvattend:

- Bij dunne deklagen: hoogste spanning in het BM.
 - NOOT: Let op eierschaal effect: harde laag op zachte ondergrond!
- Bij dikke deklagen: hoogste spanning in deklaag: Cohesie deklaag is bepalend (bv laag oxide gehalte gunstig)
- Grensgeval: Hoogste spanning op interface deklaag-BM: Adhesieve sterkte bepalend. Doorgaans zwakste schakel in TS-gespoten lagen.

Slijtage testmethoden

- Rubber wheel test (ASTM G-65)
- Schuurtest (ASTM G-28)
- Pin on Disk/Ball on Disk (ASTM G-99)
- Tribometer, meting wrijving en slijtage eigenschappen (DIN 51834)
- Block-on-Ring (ASTM G-77)
- Slurry abrasie test / Miller test (ASTM G-95)
- Impact testen, bv Valtest (TS'98)
- Straaltest (TS'98) (Afgeleid van ASTM G-76, Solid particle erosion test)

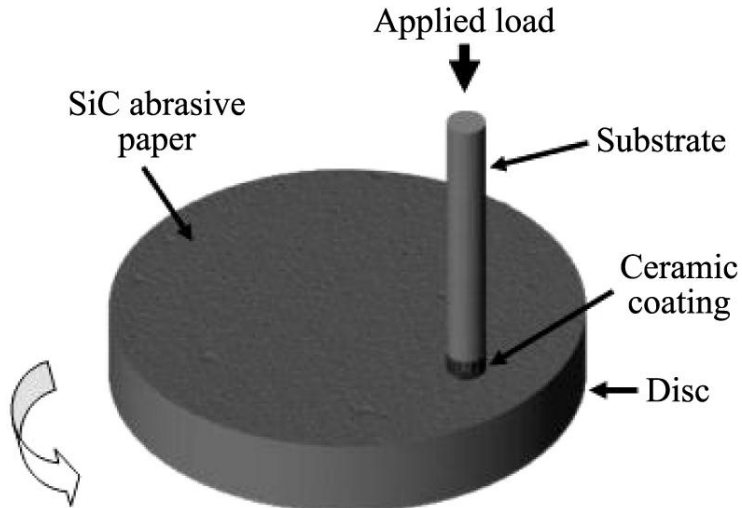


Slijtage testmethoden - abrasie

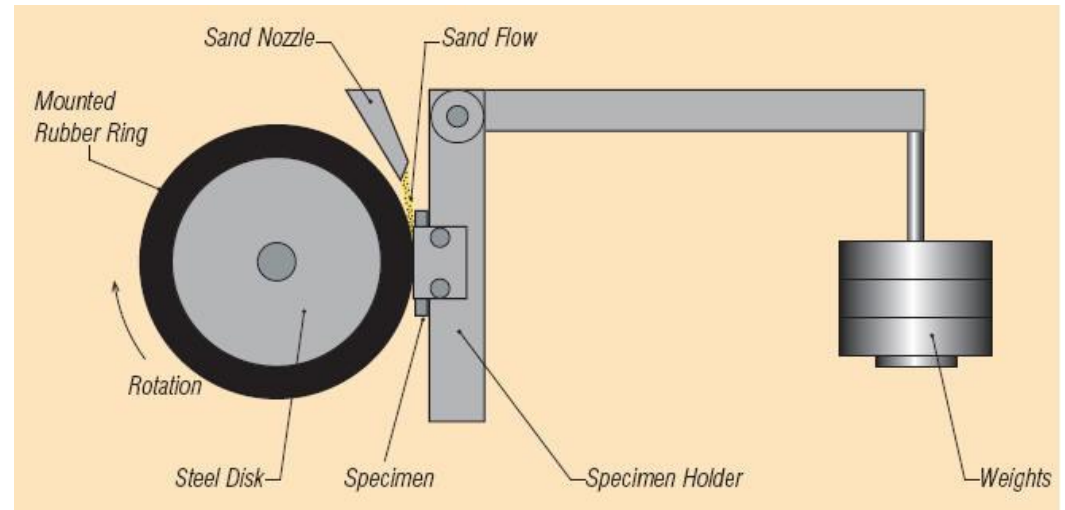
Rubber wheel abrasie test (ASTM G-65)

- Abrasie test
- Monster gewicht wordt regelmatig gemeten.
- Aanname van constant condities voor slijtage (alternatief voor 'schuur abrasie test')

Schuur test (eenvoudig) (ASTM G-28)



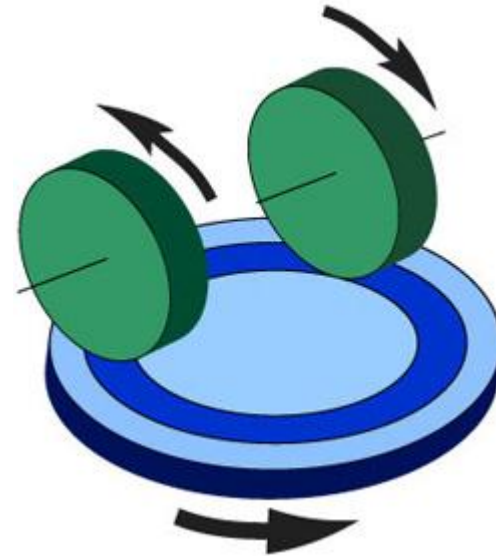
Rubber Wheel Abrasie test (ASTM G-65)



Slijtage testmethoden - abrasie

Taber test (bv: ASTM G195-08, ASTM 1044)

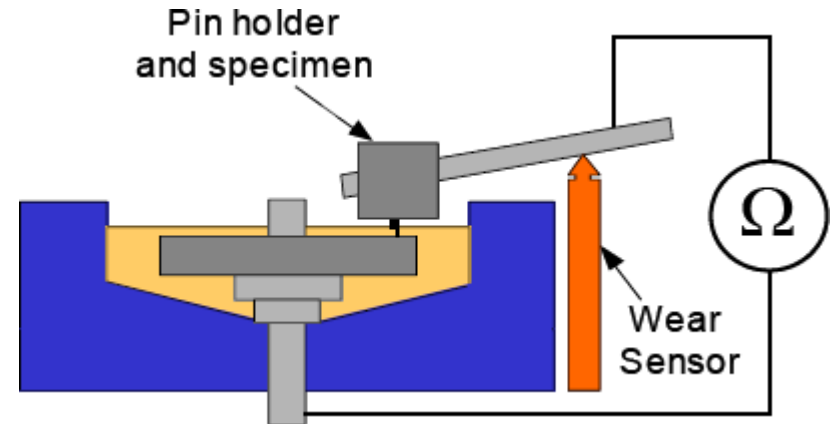
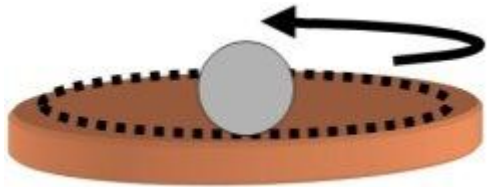
- Abrasie door abrasieve wielen die een glijdende-rotatie slijtage opwekken
- Abrasie slijtvastheid wordt in alle richtingen getest.



Slijtage testmethoden

Pin on Disk test (ASTM G-99)

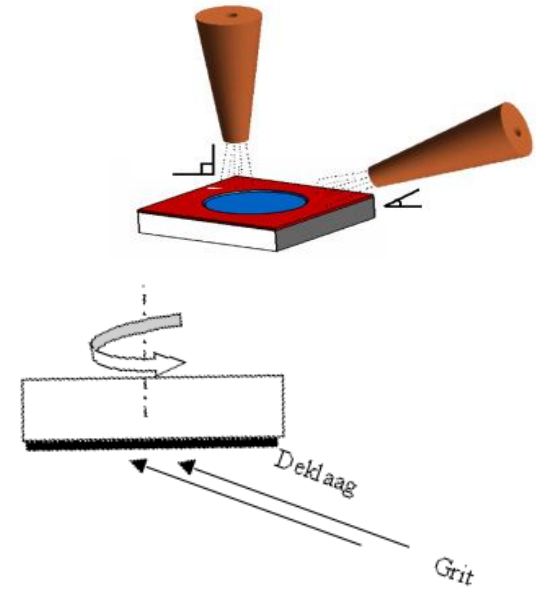
- Een vaste kogel of pin wordt met een belasting op een roterende schijf gedrukt



Slijtage testmethoden

Straaltest-TS98 / Erosie test ASTM G-76

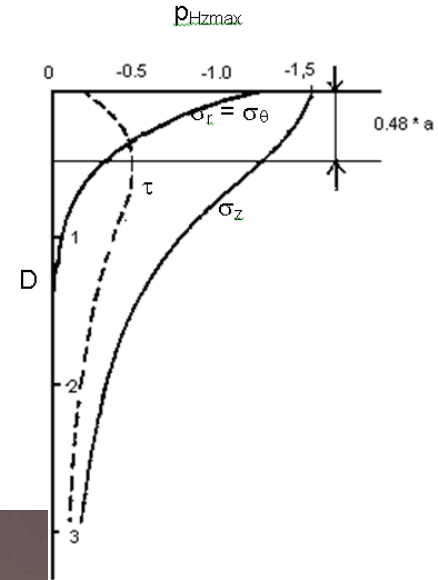
- Meting van gewichtsverlies na verschillende tijdsintervallen
- Eenvoudig toe te passen in bijna elke straalkast (bij alle spuitbedrijven aanwezig)



Slijtage testmethoden

Impact test-TS98

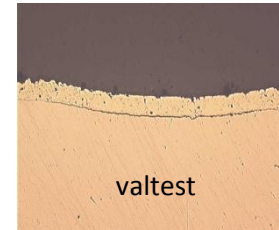
- Een kogel met gedefinieerd gewicht en diameter, valt met een gedefinieerde energie (snelheid) op een substraat met coating of wordt er horizontaal opgeschoten
- Er ontstaan Hertziaanse (afschuif-)spanningen
- Resultaat is wel impulssnelheid afhankelijk.
Afhankelijkheid bepaald door eigenschappen coating en basismateriaal (bv koudversteviging)
 - Hoge impulssnelheid, bv scheuren coating (deuktest)
 - Lage impulssnelheid, falen interface (valtest)



Inconel 625

1,85 J

21,94 m/s



Inconel 625

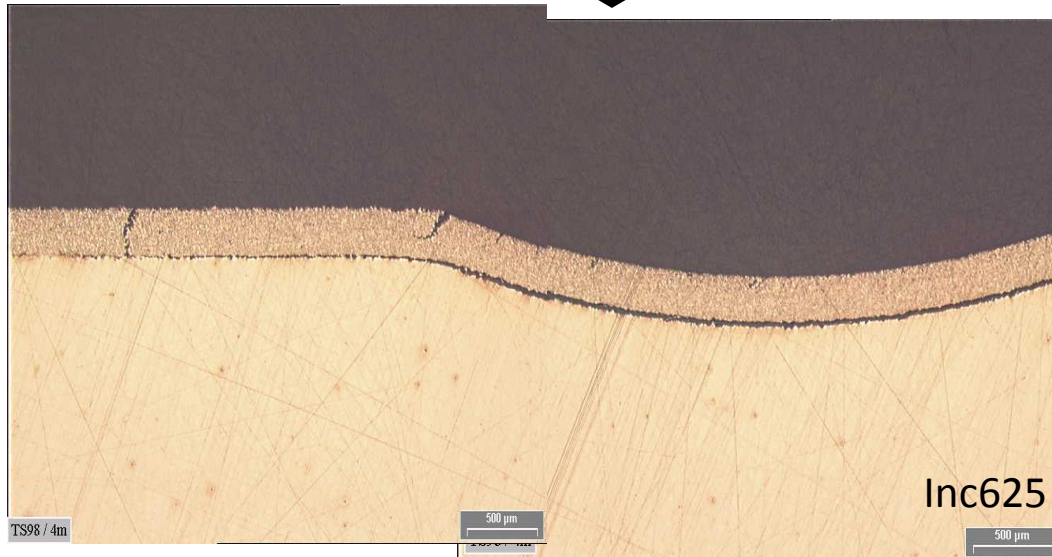
4,00 J

3,01 m/s

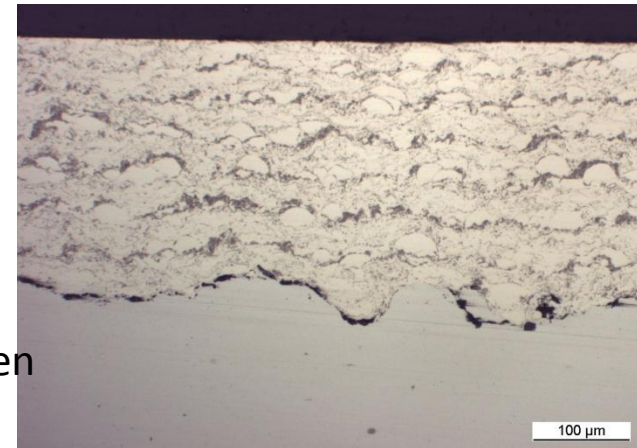
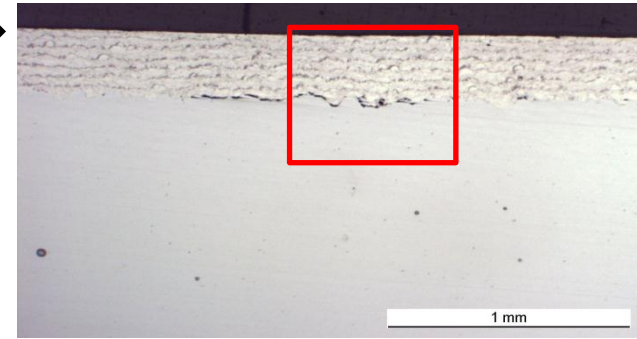
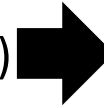
Slijtage testmethoden

Impact test-TS98

- Soms weinig schade aan oppervlak maar delaminaties op de interface (lage impuls snelheid)
- Soms is schade aan het oppervlak te zien (hoge impuls snelheid)



Inc625 deklagen

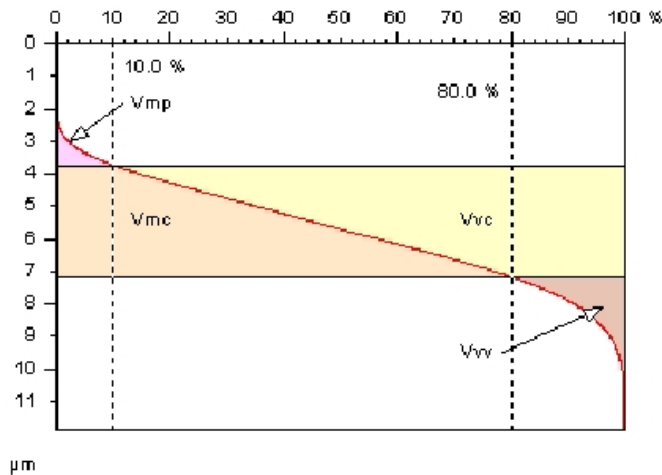
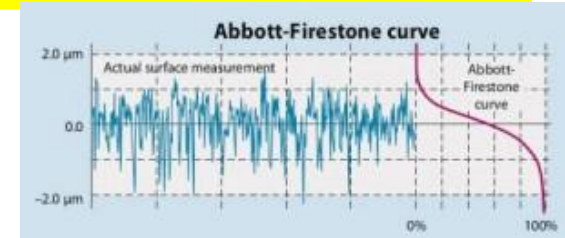


Hoe kan je slijtage karakteriseren

- Abbott-Firestone curve
- Oppervlakte ruwheid/onderzoek
- Microscopische technieken:
 - Optische microscopie, kwalitatieve 3D
 - Scanning Elektronen Microscopie (SEM), kwalitatief 3D
 - Energie Dispersieve Spectraalanalyse (EDS), vreemde deeltjes
 - Confocaalmicroscopie, Kwantitatieve 3D topografie
- Ruwheidsmetingen (mechanisch, optisch)
- Metallografie: doorsneden
- Hardheidsmetingen

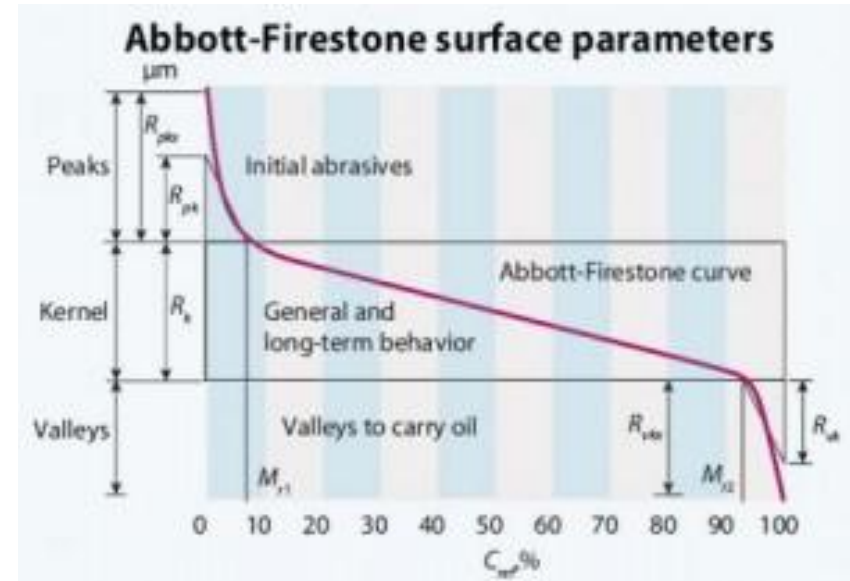
Abbott-Firestone curve

Indicatie voor de hoeveelheid vloeistof (bv voor smering) die in de ruwheid van het oppervlak kan worden opgenomen



$V_{mp} = 0.0467 \text{ ml/m}^2$
 $V_{vc} = 1.90 \text{ ml/m}^2$

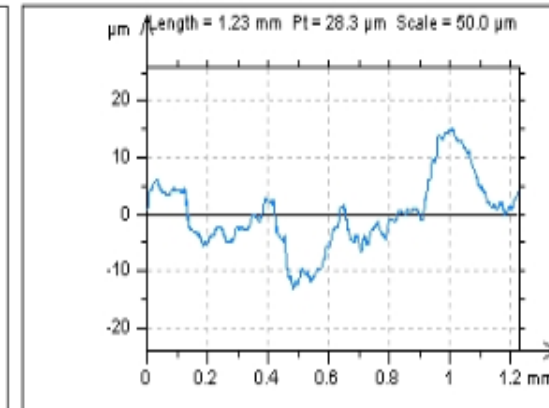
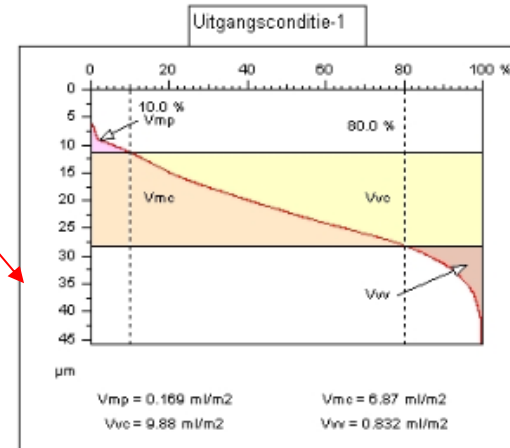
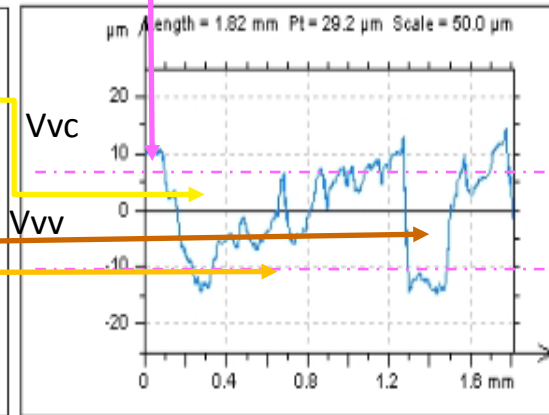
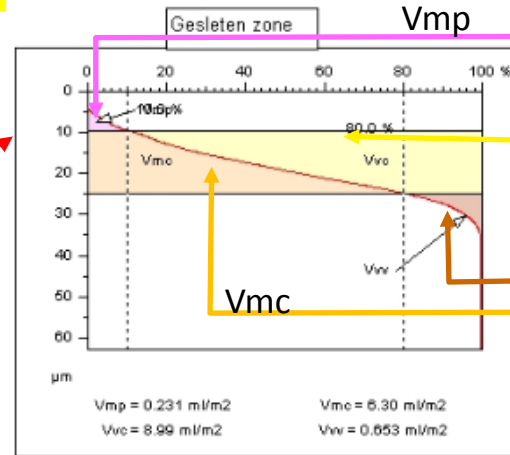
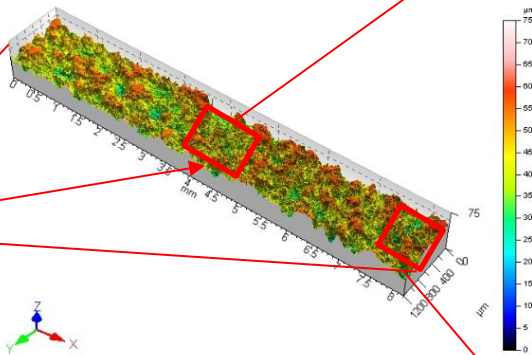
$V_{mc} = 1.54 \text{ ml/m}^2$
 $V_{vv} = 0.182 \text{ ml/m}^2$



Abbott-Firestone curve

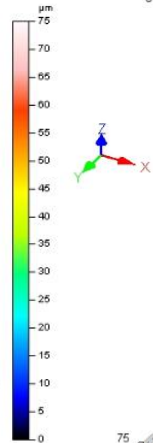
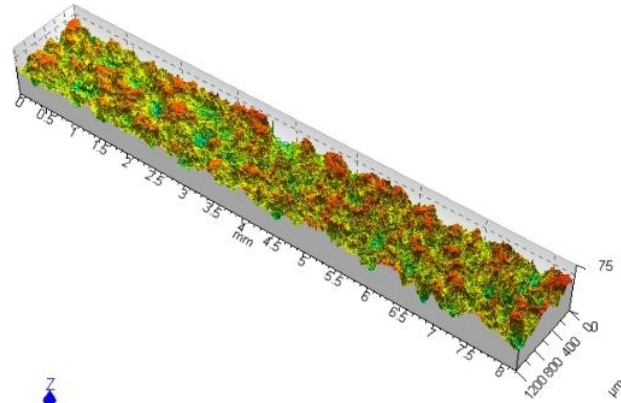
Vmp (Peak material volume): indicatie materiaal volume dat 'uitsteekt'

Vvc (Core void volume): indicatie volume dat zich kan vullen

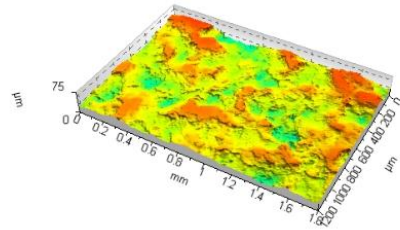


3D Karakterisering met Confocaal microscopie en SEM

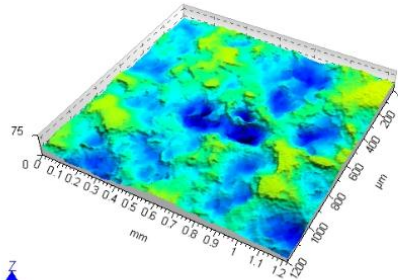
Confocaal



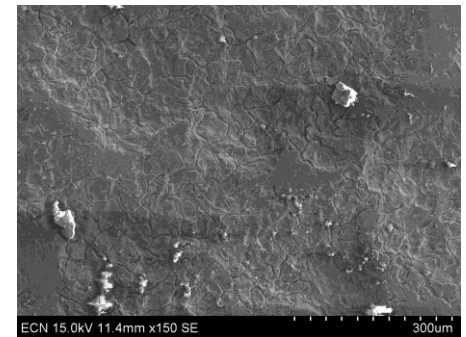
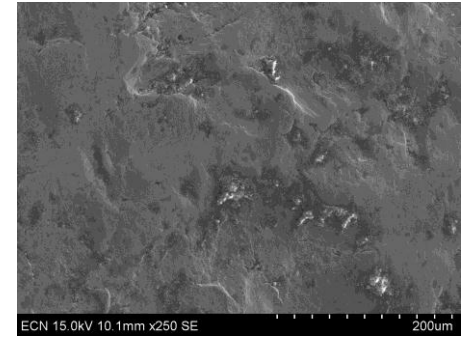
Gesleten zone



Uitgangscnditie-1



SEM



Gebruiks aspecten van belang mbt thermisch gespoten lagen



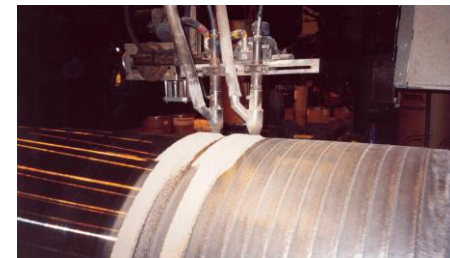
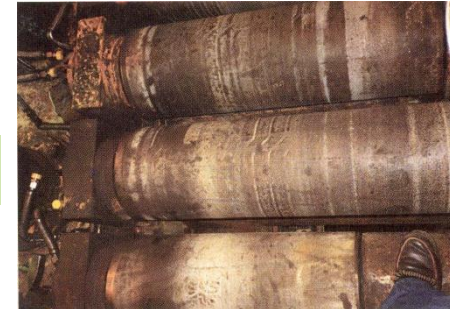
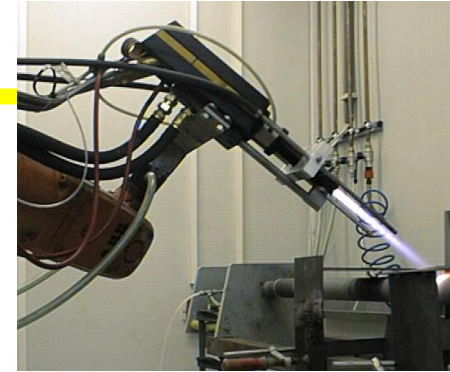
- Slijtage door deeltjes of vloeistof
- Slijtage door rollen, glijden, impact
- Chemisch

- Thermisch gespoten lagen minder bestand tegen:
 - Impact
 - Rollen (schuifspanning onder het oppervlak vs interface met BM)

Wat is er tegen te doen?

Deklagen

| | Erosie | Abrasie | Oppervlakte verm. | Impact/impingment | Adhesief | Fretting | Erosie-Corrosie |
|-------------------------|--------|---------|-------------------|-------------------|----------|----------|-----------------|
| Oplassen | -/+++ | +/+++ | -/++ | -/++ | -/+++ | -/+++ | +/+++ |
| Laser cladden | +++ | +++ | | | +++ | +++ | +++ |
| Thermisch spuiten | -/+++ | -/+++ | - | -/+ | ++ | ++ | -/+++ |
| Explosief cladden | ++ | ++ | | ++ | | ++ | ++ |
| Elektrolytische lagen | + | ++ | -- | -- | ++ | ++ | + |
| Stroomloos metalliseren | + | ++ | - | -- | ++ | ++ | ++ |
| Thermische (bad) proces | -- | -- | -- | -- | -- | + | -- |
| CVD | ++ | +++ | - | - | ++ | ++ | ++ |
| PVD | ++ | +++ | - | - | ++ | +++ | ++ |



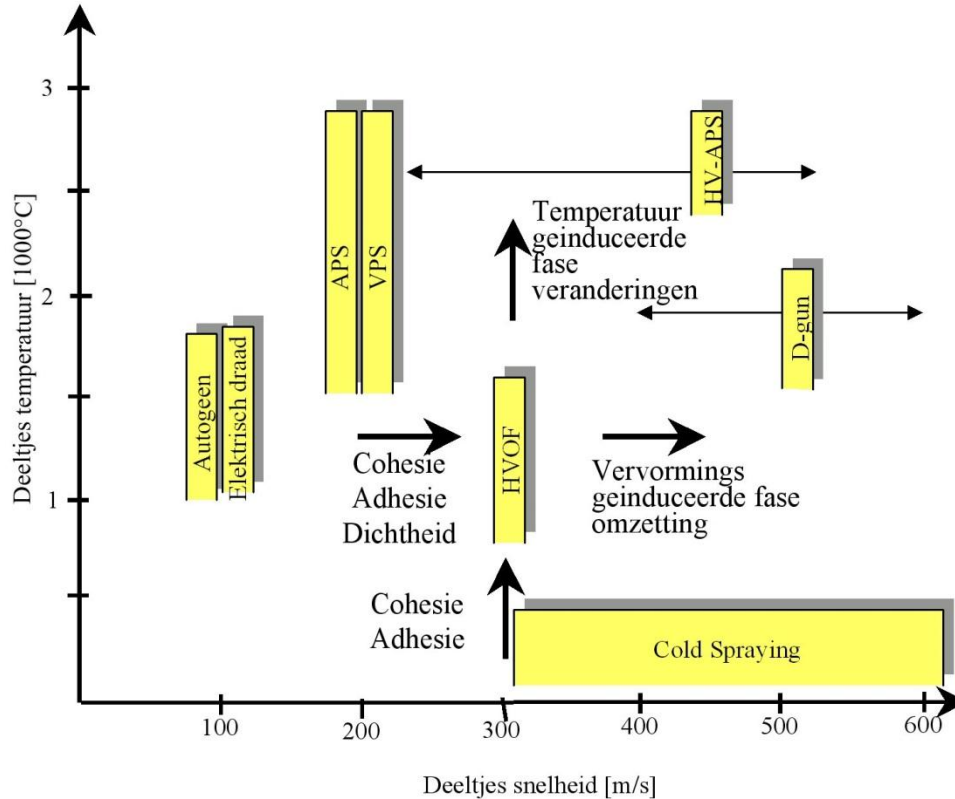
Wat is er tegen te doen?

TS- Enkele typische karakteristieken

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

Wat is er tegen te doen?

TS- Enkele typische karakteristieken



Keuze:

- Abrasie-Erosie: hoge hardheid, dichte lagen
- Impact: hoge cohesie en adhesie sterkte

Wat is er tegen te doen?

Deklagen – keuze TS-techniek



| Proces/techniek | Slijtvastheid | | | | | | |
|--------------------------------------|---------------|---------|-----------------------|--------------------|----------|----------|-----------------|
| | Erosie | Abrasie | Oppervlaktevermoeding | Impingement/impact | Adhesief | Fretting | Erosie/corrosie |
| Functionaliteit | | | | | | | |
| Thermisch spuiten | | | | | | | |
| Autogeen draadspuiten | + | + | + | + | + | + | + |
| Electrisch draadspuiten | + | + | + | + | + | + | + |
| Atmosferisch plasma spuiten (APS) | + | + | - | - | ++ | ++ | + |
| Hoge Snelheids APS | + | + | - | - | + | + | + |
| HE-Plasma | + | + | - | - | + | + | + |
| Vacuum plasma spuiten (VPS) | + | + | - | - | ++ | ++ | ++ |
| High Velocity Oxygen Fuel (HVOF) | ++ | ++ | - | + | + | + | + |
| High Pressure HVOF | +++ | +++ | - | + | + | + | +++ |
| High Velocity Air Fuel (HVOF)-Poeder | +++ | +++ | - | + | + | + | +++ |
| High Velocity Air Fuel (HVOF)-Draad | +++ | +++ | - | + | + | + | +++ |
| Detonation Gun (DG) | +++ | +++ | - | + | ++ | ++ | ++ |
| Cold spray | -- | -- | - | + | ++ | ++ | ++ |
| fusen of insmelten | +++ | +++ | ++ | ++ | ++ | ++ | ++ |

Wat is er tegen te doen? – Ontwerp & bedrijfsvoering



- Voorkom impact onder ongunstige hoeken
 - Voorkom te hoge stromingsnelheden
 - Voorkom wervelingen tgv oneffenheden
 - Voorkom te hoge oppervlakedrukken
 - Kleine repeterende bewegingen (fretting)
 - Te grote thermische wisselingen
 - Houd rekening met mogelijke deklagen
-
- Ga bij experts te raden op het gebied van materiaalkeuze en tribologie (GEEN materiaaleigenschap)

Probeer van te voren te bedenken welke typen slijtage op kunnen treden

Samenvattende conclusie

- Bezint eer gij begint
- Remedies tegen slijtage vinden in het systeem
- DE slijtagebestendigheid van een materiaal bestaat NIET
- Raadpleeg experts

1: basismateriaal

2: tegenliggend stui

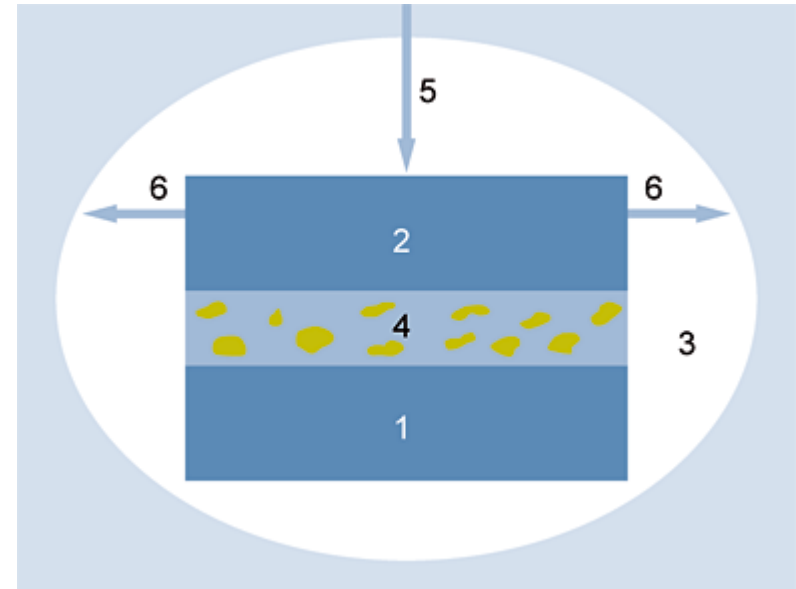
3: invloeden van de omgeving:

Temperatuur, Relatieve vochtigheid, druk

4: Tussenliggend materiaal; Olie, vet, water, deeltjes, onzuiverheden

5: Belasting

6: Beweging



Vragen & Discussie



Dank voor uw aandacht

Deze presentatie werd samengesteld in nauwe samenwerking met:

ECN

Westerduinweg 3
1755 LE Petten
The Netherlands

P.O. Box 1
1755 ZG Petten
The Netherlands

T +31 88 515 49 49
F +31 88 515 44 80

info@ecn.nl
www.ecn.nl



ECN

Westerduinweg 3
1755 LE Petten

Postbus 1
1755 LG Petten

T 088 515 4949
F 088 515 8338
info@ecn.nl
www.ecn.nl

