

## Tribologie : een zaak van oppervlakken

***Citation for published version (APA):***

Gee, de, A. W. J., Landheer, D., & Thijsse, C. J. (1991). Tribologie : een zaak van oppervlakken. *Materialen*, (2), 43-49.

***Document status and date:***

Published: 01/01/1991

***Document Version:***

Publisher's PDF, also known as Version of Record (includes final page, issue and volume numbers)

***Please check the document version of this publication:***

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

[Link to publication](#)

***General rights***

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

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

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

[www.tue.nl/taverne](http://www.tue.nl/taverne)

***Take down policy***

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

[openaccess@tue.nl](mailto:openaccess@tue.nl)

providing details and we will investigate your claim.

# Tribologie: een zaak van oppervlakken

A.W.J. de Gee<sup>1)</sup>, D. Landheer<sup>2)</sup> en C.J. Thijsse<sup>3)</sup>

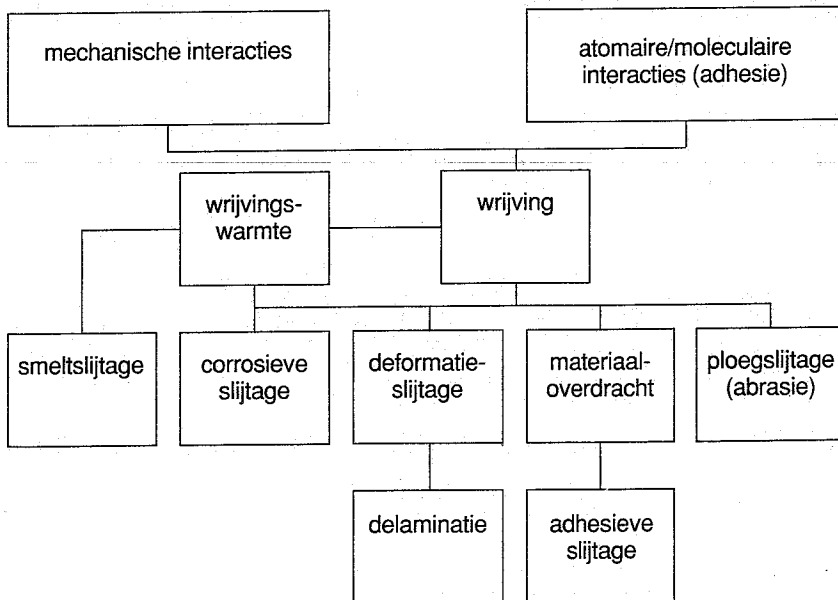
In 1966 werd de tribologie gedefinieerd als de wetenschap en de technologie van ten opzichte van elkaar bewegende contactoppervlakken. Deze definitie legt terecht sterk de nadruk op oppervlakken als essentiële elementen in een tribologisch systeem (tandwielpaar, as/lagercombinatie, afdichting, rem, maar ook menselijk gewricht). Dit geldt in het bijzonder in situaties, waarin het niet lukt om de interacterende oppervlakken geheel te scheiden door een smeerfilm. Het contact dat dan ontstaat, vindt plaats via ruwheidstoppen, waarbij als regel het ware contactoppervlak minder dan 1% van het geometrische of schijnbare contactoppervlak uitmaakt. Dit heeft belangrijke consequenties voor de plaatselijk optredende deformaties en contacttemperaturen. Deze kunnen hoge waarden bereiken, hetgeen kan leiden tot het verlopen van reacties die onder statische condities niet mogelijk zijn. In dit artikel wordt ingegaan op de consequenties hiervan voor wrijving, slijtage en op de daarmee samenhangende karakterisering van materialen voor tribologische toepassingen. Een belangrijke conclusie luidt dat de massa-eigenschappen van de aan een contact deelnemende materialen slechts zelden bepalend zijn voor hun tribologisch gedrag.

- 1) Metaalinstituut TNO, Technische Universiteit Delft, Universiteit Twente.
- 2) Instituut voor Aandrijf- en Tribotechniek, TU Eindhoven.
- 3) Centrum voor Fabrikage technieken CFT, Philips.

"Tribologie" werd in 1966 gedefinieerd door het "Peter Jost Committee" [1] in Engeland als volgt:

*"Tribology is the science and technology of interacting surfaces and of the practices, related thereto".*

In de praktijk komt dit neer op bestudering van wrijving en slijtage en op het ontwikkelen van methoden ter beheersing van deze verschijnselen. Verlaging van wrijving en slijtage wordt voornamelijk bewerkstelligd door smering in de een of andere vorm. Invoering van één term, in het Nederlands "tribologie", voor deze activiteiten heeft als voordeel dat daarmee het werk van specialisten van sterk uiteenlopende aard, te weten wiskundigen, werktuigbouwers, natuurkundigen en chemici, onder één noemer wordt gebracht.



Figuur 2: Overzicht van de verschillende slijtagemechanismen, die kunnen optreden onder condities van glijdend contact, en hun relatie tot wrijving.

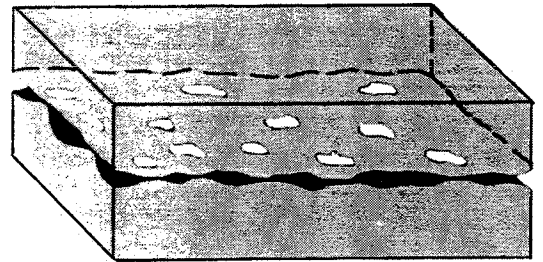
## Opmerkingen:

In de figuur wordt aangegeven dat wrijving ontstaat door twee oorzaken, namelijk mechanische interacties tussen de ruwheden, die op de oppervlakken voorkomen ("deformatiecomponent van de wrijving") en atomaire of moleculaire adhesie in het contactvlak ("adhesiecomponent van de wrijving"). Welke component overheerst hangt af van de condities, waaronder het contact plaatsvindt. Extremen zijn droge metaaloppervlakken, waar de adhesiecomponent sterk overheerst, en contact tussen een kunststof en een ruw metaal tegenloopvlak, waar de deformatiecomponent zeer belangrijk is.

Onder condities van rollend contact, zoals optreedt in wentellagers, kan oppervlaktevermoeiing het belangrijkste slijtagemechanisme zijn. Op microschaal kan dit mechanisme ook een rol spelen bij deformatieslijtage en adhesieve slijtage.

Voorbeelden van toepassingsgebieden, waar de tribologie belangrijk is, zijn:

- *Biomechanica*: natuurlijke gewrichten en kunstgewrichten.
- *Geomechanica*: beheersing van aardbevingen door beïnvloeding van de wrijving tussen verschillende aardlagen (vooral nog niet op grote schaal toepas-



Figuur 1: Schematische voorstelling van het contact tussen oppervlakken.

baar) en bestudering van erosieprocessen die optreden in de natuur.

- *Werktuigbouwkunde*: ontwerp, inspectie en onderhoud van lagers, afdichtingen, tandwielen, koppelingen, rechtgeleidingen, band/weg-contacten, baggerinstallaties, e.d. en smering en oppervlaktemodificatie van gereedschappen.

Als de tribologie wordt toegepast in de werktuigbouwkunde, spreekt men in het Nederlands wel van "tribotechniek".

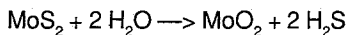
## Contact tussen oppervlakken

In de definitie van tribologie wordt terecht sterk de nadruk gelegd op oppervlakken als essentiële elementen in een tribologisch systeem. Dit geldt in het bijzonder in situaties, waarin het niet lukt om de interacterende oppervlakken geheel te scheiden door een vloeibare of gasvormige smeerfilm. Het contact, dat dan ontstaat, wordt schematisch gekarakteriseerd door figuur 1. Zowel theoretische beschouwingen als experimenten wijzen uit dat het zogenaamde "ware contactoppervlak" (dus de som van de witte plekken in figuur 1) in het algemeen minder dan 1% van het "schijnbare" of "geometrische" contactoppervlak uitmaakt [2]. Aangezien krachtoverdracht tussen de loopvlakken via de aldus ontstane microcontacten plaatsvindt, treden plaatselijk zeer sterke deformaties op. Bij metalen wordt plaatselijk vrijwel steeds een toestand van volledige plasticiteit bereikt, zoals bij een hardheidsmeting. Bovendien krijgt men, door de sterk geconcentreerde ontwikkeling van wrijvingswarmte, te maken met lokale en meestal kortstondige temperatuurverhoging.

Met behulp van een betrekkelijk eenvoudig rekenmodel [3], dat is gebaseerd op het baanbrekend werk dat in de jaren dertig werd verricht door de Nederlander prof.ir. H. Blok, berekent men bijvoorbeeld "flitstemperaturen" van de orde van 500 °C voor een ongesmeerd staal/staal-contact met wrijvingscoëfficiënt  $f = 0,35$ , glijnsnelheid  $v = 1$  m/s en normaalkracht  $F = 500$  N. Dit alles heeft tot gevolg dat ter plaatse van de microcontacten voldoende activeringsenergie wordt vrijgemaakt voor het optreden van allerlei tribochemische reacties, die "in vitro" niet verlopen.

Een "klassiek" voorbeeld van het optreden van een dergelijke "tribochemische reactie" is de hydrolyse van

molybdeendisulfide  $\text{MoS}_2$ , een bekend "vast smeermiddel", dat vooral onder vacuümcondities goede diensten bewijst. Men kan deze stof in vitro koken met water, of zelfs met zoutzuur, zonder dat ontleding optreedt: ofschoon thermodynamisch gezien het  $\text{MoS}_2$  zou moeten ontleden, is de activeringsenergie blijkbaar te hoog. Onder wrijvingsomstandigheden, in een atmosfeer van vochtig argon, vormt zich echter ogenblikkelijk zwavelwaterstof  $\text{H}_2\text{S}$ , volgens de reactie :



In vochtige lucht (natuurlijk een veel praktischer situatie) oxydeert het zich vormende  $\text{H}_2\text{S}$  onmiddellijk verder tot zwavel en zwaveldioxyde (prikkelende geur!).

In het algemeen kan men stellen dat de mate waarin lokale vervormingen, temperatuurverhoging, oxydatie en andere "tribochemische reacties", opname van oxyden of andere reactieproducten door de oppervlakken, wrijvingspolymeervorming, e.d. optreden, het tribotechnisch gedrag van materiaalcombinaties bepaalt. Dit gedrag kan in het algemeen niet worden voorspeld op basis van materiaaleigenschappen, die onder stationaire (dus niet-tribotechnische) omstandigheden zijn bepaald. Zo zal het in het algemeen zeer moeilijk zijn om van nieuwe materialen a priori te voorspellen welk van de volgende vijf, essentieel verschillende, slijtagemechanismen de overhand zal krijgen (zie ook figuur 2):

- *corrosieve slijtage*: chemische reactie met de omringende atmosfeer (bijvoorbeeld oxydatie) en gedurige verwijdering van de gevormde reactieproducten (bijvoorbeeld oxyden);
- *ploegslijtage* of *abrasieve slijtage*: verspaning op microschaal;
- *deformatieslijtage*: verplaatsing van materiaal uit het contactvlak onder invloed van wrijvingskrachten;
- *adhesieve slijtage*: materiaaloverdracht van het ene loopvlak naar het andere door de vorming van "wrijvingslassen" ter plekke van de microcontacten;
- *oppervlaktevermoeiing*: vermoeiing, ingeleid onder het contactoppervlak ter hoogte van de maximale onderhuidse (schuif)spanning.

Elk van deze slijtagemechanismen is op eigen wijze gerelateerd aan specifieke materiaalkenmerken zoals warmtegeleiding, sterkte, taaiheid, bindingsneiging ("affiniteit") van de contactpartners, reactiviteit in relatie tot de omgeving, etc.

Aangezien in de praktijk slechts zelden een enkel slijtagemechanisme in zuivere vorm een rol speelt en de optredende mengvorm meestal onvoorspelbaar is, is kwantitatieve voorspelling van het slijtagegedrag van materialen op basis van specifieke materiaalkenmerken in het algemeen niet mogelijk.

In een volgende paragraaf wordt een aantal voorbeelden gegeven van deze "intrinsieke onvoorspelbaarheid" van tribologische processen en het, daarmee verband houdende, belang van een *systembenadering* bij de materiaalkeuze. Eerst wordt echter ingegaan op de vraag hoe slijtage samenhangt met enerzijds wrijving en anderzijds "sterkte" van de loopvlakken.

#### Samenhang tussen slijtage, wrijving en "sterkte"

Wrijving veroorzaakt tractiekrachten in de oppervlaktezone van materialen, hetgeen veelal gepaard gaat met de een of andere vorm van slijtage. Voor ploegslijtage, deformatieslijtage, adhesieve slijtage en oppervlaktevermoeiing geldt daarbij in eerste, zeer grove benadering dat die slijtage in belangrijke mate afhangt van de verhouding  $f/S_0$ , waarin  $f$  de wrijvingscoëfficiënt, gedefinieerd als het quotiënt van tractiekracht  $F_T$  en normaalkracht  $F_N$ , en  $S_0$  de "sterkte" \* van de oppervlaktezone van de zwakste van de twee contactmate-

rialen voorstelt. De bovengenoemde relatie is zonder nadere, kwantitatieve uitwerking zeker niet geschikt voor a priori voorspellingen van de grootte van de slijtagesnelheid. In kwalitatieve zin is hij echter van belang bij de ontwikkeling van nieuwe materialen met (veronderstelde) gunstige slijtage-eigenschappen.

Als men bijvoorbeeld door toevoeging van een bepaalde structuurcomponent (bijvoorbeeld polytetrafluorethyleen PTFE) probeert om de waarde van  $f$  drastisch te verlagen, moet men zich scherp bewust zijn van het feit dat men de kans loopt tegelijkertijd een meer dan evenredige daling van  $S_0$  te bewerkstelligen, waardoor het uiteindelijk resultaat ongunstig is! Voorbeelden van sterk uiteenlopende materiaalcombinaties, die een gunstige (lage)  $f/S_0$  verhouding en een lage specifieke slijtagesnelheid\*\*  $k$  (te weten tussen  $10^{-16}$  en  $10^{-15}$   $\text{m}^3/\text{Nm}$ ) bezitten, zijn:

- Nylon (PA 66), gevuld met 15% PTFE in contact met staal: zeer lage  $f$ , lage  $S_0$ ;
- Aluminiumoxyde in contact met aluminiumoxyde in een omgeving van water: hoge  $f$ , zeer hoge  $S_0$ ;
- "Grensgesmeerd" loodbrons in contact met staal ("klassieke" lagercombinatie): lage  $f$ , middelmatige  $S_0$ .

In deze voorbeelden is de technische bruikbaarheid van de genoemde contactsystemen steeds te danken aan de vorming van een laag met relatief lage afschuifsterkte aan het oppervlak. Bij nylon met PTFE vormt zich door extrusie onder belasting een PTFE-film op het tegenloopvlak (het staal), die voor een lage waarde van  $f$  zorgt (orde van grootte 0,1). Bij water-gesmeerd aluminiumoxyde hechten de polaire watermoleculen zich aan het oppervlak, waardoor  $f$ -waarden van de orde van 0,3 bereikt worden. Dit is nog relatief laag, vergeleken met  $f$ -waarden van ongesmeerd  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , die kunnen oplopen tot meer dan 1. Bij "grensgesmeerd" lagerbrons tenslotte hechten zich zeepvormende "additieven" uit het smeermiddel aan het brons, die verantwoordelijk zijn voor  $f$ -waarden van de orde van 0,15. In het algemeen wordt "grenssmering" gedefinieerd als een smeringsvorm, verkregen door zachte oppervlaktelagen, ontstaand door adsorptie van componenten uit een vloeibaar smeermiddel, door chemische reactie of door plaatselijk vast worden van het smeermiddel. Bij "zuivere" grenssmering draagt hydrodynamische drukopbouw in het smeermiddel niet (meer) bij tot het dragen van de belasting. Een additioneel, belangrijk voordeel van een lage  $f$ -waarde is dat daardoor de ontwikkeling van wrijvingswarmte en daarmee de temperatuurstijging in het contactvlak, beperkt wordt. Gezien het voorgaande dient men bij ontwikkeling van nieuwe, tribologisch interessante materialen of oppervlaktebehandelingen te streven naar materialen, die een hoge  $S_0$  combineren met een lage  $f$ . In het bijzonder de laatstgenoemde eis (lage  $f$ ) geeft problemen, aangezien de wrijvingscoëfficiënt een typische *systemeigenschap* is, die mede afhangt van de aard van het tegenloopvlak (veelal laaggelegeerd staal) en het omringend medium (lucht, water, smeermiddel, etc.). Materiaalontwikkeling, gericht op verbetering van tribologische eigenschappen, dient dus in elk geval systeem-gericht en zo mogelijk applicatie-gericht te zijn!

#### Voorbeelden "intrinsieke onvoorspelbaarheid" gedrag van tribologische systemen

##### Wrijvingspolymeervorming in glijlagers

Koper/tin-legeringen, bekend als "lagerbronzen", bevatten gewoonlijk geen tinoxyde. Dit komt omdat tijdens het smelten de smelt gedesoxydeerd wordt met "koperfosfor" (koper met ca. 10%  $\text{Cu}_3\text{P}$ ). Als zuurstof in de smelt doordringt, oxydeert het fosfor preferent, waardoor oxydatie van de metalen voorkomen wordt. Het

\* In kwantitatieve beschouwingen zal men, afhankelijk van het optredend slijtagemechanisme, voor  $S_0$  de breuksterkte, de vermoeiingssterkte of de afschuifsterkte moeten invullen.

\*\* De specifieke slijtagesnelheid, veelal aangeduid met met de letter  $k$ , wordt uitgedrukt in termen van volumeverlies, per eenheid van opgelegde normaalkracht, per eenheid van afgelegde contactweg:  $\text{m}^3/\text{Nm}$ .

gevormde fosforoxyde komt in de slak terecht. Indien gewenst kan men oxyde- en fosforvrije legeringen bereiden door het samensmelten van de zuivere legeringscomponenten onder vacuüm. Exposeert men een fosforhoudende smelt enige tijd aan de lucht, waardoor de overmaat fosfor wordt weggeoxydeerd, dan krijgt men een legering die enig tinoxyde bevat. Dit wordt aangetroffen in de vorm van fijnverdeelde kristalletjes met een doorsnede van gemiddeld zo'n  $0,03 \mu\text{m}^2$ .

Laboratoriumproeven zowel als metingen aan complete lagers [4] wijzen uit dat koper/tin-legeringen met ca. 0,1 vol% tinoxyde zich bijzonder gunstig gedragen, mits het smeermiddel enige opgeloste zuurstof bevat (hetgeen in de praktijk meestal het geval is). Dit verschijnsel wordt geïllustreerd in figuur 3. Men ziet dat de specifieke slijtagesnelheid van het brons relatief zeer gering is, als gewerkt wordt met een materiaal dat tinoxyde bevat en als bovendien het smeermiddel wordt belucht. Uit de figuur blijkt overigens dat ook de aard van het contramateriaal (dus het materiaal van de as) van invloed is op de optredende bronslijtage. De verklaring voor de gunstige werking van tinoxyde is dat dit de vorming van oppervlakte-actieve, hoog polymere producten, zogenaamde wrijvingspolymeren, aan het oppervlak katalyseert. Een dergelijke polymeervorming is alleen mogelijk als zich in het smeermiddel geschikte "bouwstenen" bevinden. Deze bouwstenen bestaan in dit geval uit vrije radicalen, die zich onder invloed van zuurstof uit de omringende atmosfeer in het smeermiddel vormen. Dit maakt dat het gunstige gedrag van tinoxydehoudend brons verloren gaat als met een geheel zuurstofvrij smeermiddel, dus bijvoorbeeld met een smeermiddel onder argon als schutgas, gewerkt wordt.

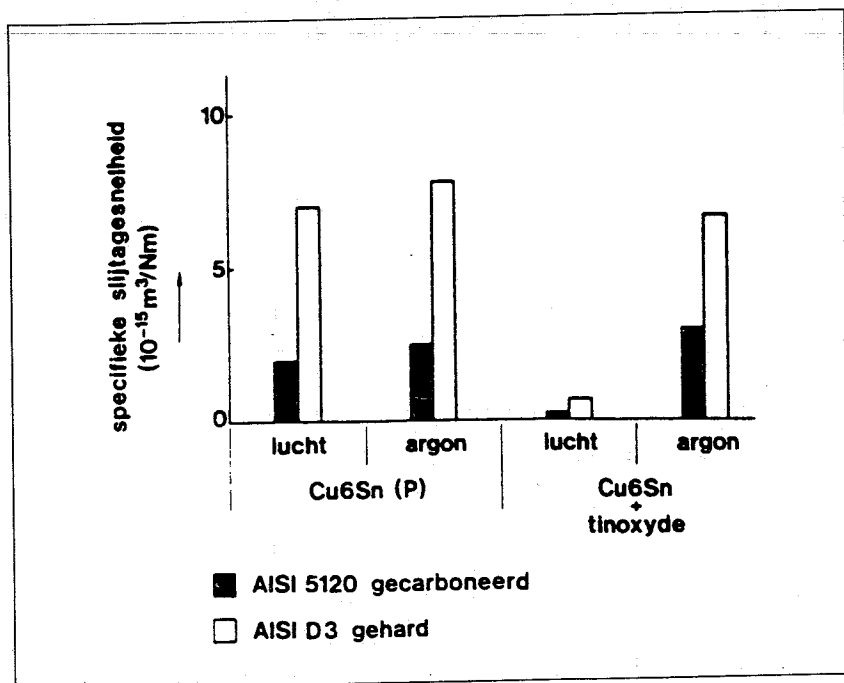
De propositie om koper/tin-lagers, met daarin een kleine hoeveelheid tinoxyde, te vervaardigen door expositie van de smelt aan de lucht is praktisch weinig aantrekkelijk. Een te grote overmaat tinoxyde (vanaf 1%) leidt namelijk tot ontoelaatbare verbrossing van het materiaal. Dit probleem kon worden opgelost door toepassing van de metaalopsputtechniek, waarmee

het mogelijk is om een fosforhoudende koper/tin-legering bij hoge temperatuur te verspuiten onder lichtoxyderende condities, waardoor een oppervlak van de gewenste samenstelling ontstaat. Deze techniek werd geperfectioneerd door een fabrikant van zware grondverzetmachines en vervolgens met succes toegepast bij de vervaardiging van glijlagers voor dergelijke apparatuur.

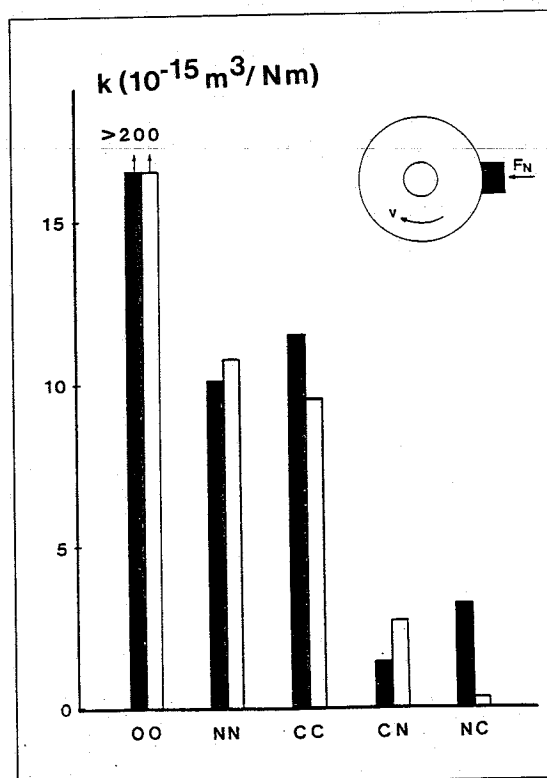
Uit figuur 3 kan worden afgelezen dat de specifieke slijtagesnelheid (veelal aangeduid met de letter k) van het tinoxydehoudend brons in belucht smeermiddel van de orde  $0,5 \cdot 10^{-15} \text{m}^3/\text{Nm}$  is. Dit is een waarde, die voor vele praktische toepassingen toelaatbaar zal zijn, zeker als voor een deel van de tijd gehele of gedeeltelijke loopvlakseparatie door druk-opbouw in het smeermiddel kan worden bereikt (hydrodynamische smering). Wat dit betreft geldt de "vuistregel" dat technisch interessante nieuwe materialen of materiaal-combinaties in het algemeen k-waarden bezitten die kleiner zijn dan  $1 \cdot 10^{-15} \text{m}^3/\text{Nm}$ , hetgeen overigens niet uitsluit dat voor sommige toepassingen hogere k-waarden toelaatbaar kunnen zijn.

### Slijtage gecarboneerde en genitrocarboneerde loopvlakken

Een interessante mogelijkheid om de tribologische eigenschappen van loopvlakken te verbeteren is gelegen in oppervlaktebehandeling. In principe kan het daarbij zowel om zachte lagen met lage afschuifsterkte (lage f) als om harde lagen (hoge  $S_0$ ) gaan. Ook combinaties van "zacht" op "hard" komen voor (zeer gunstige f/ $S_0$  verhouding!). Bij zachte lagen kan men denken aan galvanisch opgebrachte of opgedampte lagen van zachte, soldeerachtige legeringen met een lage affiniteit voor het materiaal van het tegenloopvlak (meestal staal), aan fosfateren of aan het aanbrengen van "glijlakken" op basis van kunsthars, gevuld met een "vast smeermiddel" als grafiet of het al genoemde



Figuur 3: Het effect van wrijvingspolymeervorming op de specifieke slijtagesnelheid k van lagerbrons Cu6Sn tegen gecarboneerd staal 20MnCr5 en gehard staal X210Cr12. Beproevingapparatuur: blok op ring. Belasting: 3000 N. Glijnsnelheid: 0,07 m/s. Smeermiddel: SAE 10W olie van 60 °C. Smeringsconditie: grenssmering.



Figuur 4: Specifieke slijtagesnelheid k, gemeten aan onbehandelde (O), gecarboneerde (C) en gecarbonitreeerde (N) staaloppervlakken. Beproevingapparatuur: blok op ring. Belasting: 100 N. Glijnsnelheid: 0,2 m/s. Milieu: droge lucht van 20 °C. Smeringsconditie: droge wrijving.

type proces	maximale laagdikte ( $\mu\text{m}$ )	maximale temperatuur werkstuk ( $^{\circ}\text{C}$ )	in aanmerking komende materialen	maximaal te bereiken hardheid (HV)
thermisch harden	5000	950	staal	900
thermo-chemisch	20...400	400..1000	staal + C, N, B, Cr of V	500..2000
elektro-chemisch	500	50	Cr $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{Co}$	1000 2500/500
chemisch	100	90	Ni(P) of Ni(B)	950
opspuiten	1000	100*	Mo + oxyden 13% Cr-staal NiAl Co-legeringen WC/Co of $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{NiCr}$ cermets $\text{Al}_2\text{O}_3$ of $\text{Cr}_2\text{O}_3$	400 350 350 700 1000** 2400
oplassen	20 000	1400	12% Mn-staal martensitisch staal of gietijzer cobaltlegeringen WC/Ni	600 900 700 700**
CVD	10	1000	TiC, TiN, $\text{W}_2\text{C}$ , WC, $\text{Al}_2\text{O}_3$ , enz.	3000
PVD (ion plating)	150	100	TiC, TiN, $\text{W}_2\text{C}$ , WC, $\text{B}_4\text{C}$ , $\text{Si}_3\text{N}_4$ , enz.	4000

\* Niet ingesmolten lagen, bijvoorbeeld verkregen met detonatie-apparatuur of plasmatoorts.

\*\* Maximale hardheid van de matrix. De carbiden kunnen hardheden van 1500 tot 3000 HV bezitten.

Tabel 1:  
Overzicht van een aantal oppervlaktebehandelingstechnieken.

molybdeensulfide. Een globaal overzicht van mogelijke harde lagen en hun bereidingswijze vindt men in tabel 1. In elk van de in deze tabel genoemde categorieën vinden nog regelmatig belangwekkende ontwikkelingen plaats, terwijl voor speciale toepassingen niet in de tabel genoemde processen zijn ontwikkeld (zoals bijvoorbeeld het Nederlandse "Hardcor"-proces, waarmee roestvast staal van een slijtvaste laag kan worden voorzien).

Een groot probleem voor de (potentiële) gebruiker van dergelijke processen is dat het tribologisch gedrag van de desbetreffende oppervlakken in sterke mate afhangt van de condities waaronder zij worden gebruikt. Bovendien bestaat nauwelijks inzicht in de onderlinge kwaliteitsverhoudingen onder bepaalde, goed gedefinieerde gebruiksomstandigheden. Als voorbeeld toont figuur 4 de resultaten van laboratoriumproeven met onbehandelde (O), gecarboneerde (C) en genitrocarboneerde (N) loopvlakken, uitgevoerd onder condities van droge wrijving in een "blok op ring"-opstelling in droge lucht. Het blijkt dat, onder de gekozen beproevingscondities, contact tussen onbehandelde oppervlakken, k-waarden groter dan  $200 \cdot 10^{-15} \text{ m}^3/\text{Nm}$  oplevert.

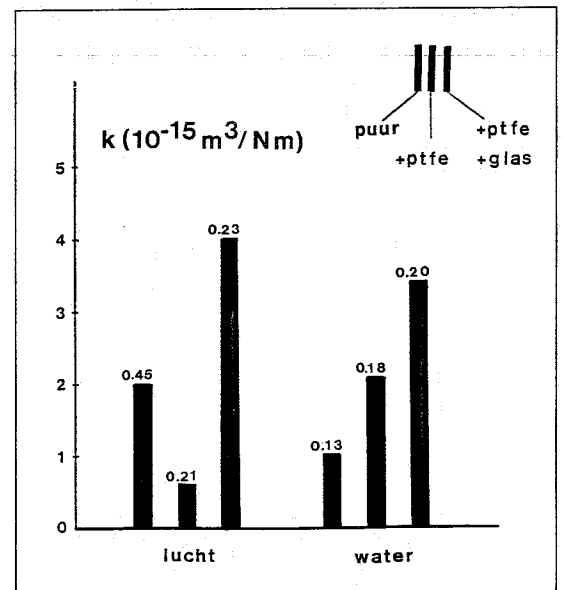
Vervolgens blijkt dat zowel nitrocarbeneren (N) als carboneren (C) een aanzienlijke reductie in k teweegbrengt, te weten tot waarden van  $10-12 \cdot 10^{-15} \text{ m}^3/\text{Nm}$ . De optredende volumenslijtage is ongeveer gelijk verdeeld over het (stationaire) blok en de (roterende) ring. Echt interessant wordt het echter pas als combinaties van gecarboneerde (C) en genitrocarboneerde (N)

oppervlakken worden gemaakt. Het blijkt dat dan de k-waarden dalen tot waarden, variërend van  $0,3$  tot  $3 \cdot 10^{-15} \text{ m}^3/\text{Nm}$ , afhankelijk van de vraag welk onderdeel (het blok of de ring) de carboneerbehandeling heeft ondergaan. Deze sterke reductie in slijtagesnelheid is een fraaie illustratie van het "ongelijksoortigheidseffect". Dit zegt dat de loopeigenschappen van materialen beter worden, naarmate de glijpartners sterker van elkaar verschillen, d.w.z. minder bindingsneiging vertonen. In de tribotechniek treft men vele voorbeelden van dit effect aan, bij kunststof/kunststof-combinaties evengoed als bij metalen en keramische materialen. Figuur 4 laat ook nog zien dat het voor het uiteindelijk resultaat van belang is welk van de contactpartners (het blok of de ring) wordt gecarboneerd, respectievelijk genitrocarboneerd. Wil men vooral de as sparen (een situatie die in de praktijk nogal eens voorkomt), moet men kennelijk de as carboneren.

De verklaring van dit verschijnsel moet waarschijnlijk worden gezocht in de invloed van "tribo-oxydatie": als het gecarboneerde materiaal zich op de ring bevindt, krijgt dit gedurende de tijd waarin geen contact met het blok plaatsvindt, de gelegenheid om te oxyderen, hetgeen het oppervlak nog slijtvaster maakt. De voor oxydatie noodzakelijke temperatuurverhoging komt tot stand onder invloed van de in het contactvlak vrijkomende wrijvingsenergie, gegeven door het product van wrijvingscoëfficiënt, belasting (kracht) en glijnsnelheid. Kennelijk is dit effect minder geprononceerd als de ring wordt voorzien van een genitrocarboneerd oppervlak, ofwel omdat dit minder gemakkelijk oxydeert, ofwel omdat de in het contactvlak opgewekte wrijvingstemperaturen lager zijn.

#### Werking van PTFE in POM

Figuur 5 toont een voorbeeld van verklaarbaar maar, zeker in kwantitatieve zin, onvoorspelbaar tribologisch gedrag van Polyoxymethyleen (POM) in glijdend contact met roestvast staal AISI 316 in een omgeving van lucht, danwel water. Het basismateriaal werd als zodanig gebruikt, maar ook gevuld met 15% polytetrafluorethyleen PTFE en met 15% PTFE + 20% glasvezel. De condities, waaronder de experimenten werden uitgevoerd, werden zodanig gekozen, dat in geen enkel



Figuur 5:  
Specifieke slijtagesnelheid  $k$ , gemeten aan polyoxymethyleen POM in glijdend contact met staal in lucht en in water.  
Beproevingapparaat: blok op ring.  
Vlaktedruk: 5 MPa.  
Glijnsnelheid: 0,25 m/s.  
Massatemperatuur: 21  $^{\circ}\text{C}$ .  
Ruwheid staal: 0,1  $\mu\text{m}$  c.l.a.  
De getallen boven de balkjes geven de gemiddelde waarde van de wrijvingscoëfficiënt  $f$ .

geval de maximaal toelaatbare contactvlaktemperatuur (samenhangend met het optreden van structuurveranderingen in de kunststof) werd overschreden.

Uit figuur 5 blijkt ten eerste dat wanneer het contactproces verloopt in droge lucht, aanwezigheid van PTFE een zeer gunstig effect heeft op de optredende slijtagesnelheid, wederom uitgedrukt in termen van  $k$ -waarden. Uit de boven de desbetreffende balkjes genoteerde waarden van de wrijvingscoëfficiënt  $f$  blijkt dat dit ongetwijfeld moet worden toegeschreven aan een drastische verlaging in wrijving. Evenals in het eerder gegeven voorbeeld, is dit een gevolg van de vorming van een dunne laag PTFE op het stalen tegenloopvlak. Gedachtig de eveneens al eerder gegeven relatie tussen de optredende slijtage en de verhouding  $f/S_0$  kunnen we concluderen dat de aanwezigheid van PTFE kennelijk niet tot een evenredige daling in  $S_0$  leidt.

Vervolgens blijkt dat toevoeging van glasvezel de slijtage weer doet toenemen. Dit ondanks het feit dat glasvezel de mechanische sterkte van het materiaal wordt geacht te verhogen. Het blijkt tevens dat toevoeging van glasvezel nauwelijks tot wrijvingstoename leidt; de relatief sterke stijging in slijtagesnelheid die in dit geval optreedt, hangt dus naar alle waarschijnlijkheid samen met een verlaging van  $S_0$ . Vermoedelijk verstoren de glasvezels de samenhang van de POM-matrix, met als gevolg dat de sterkte ter plekke van de microcontacten vermindert.

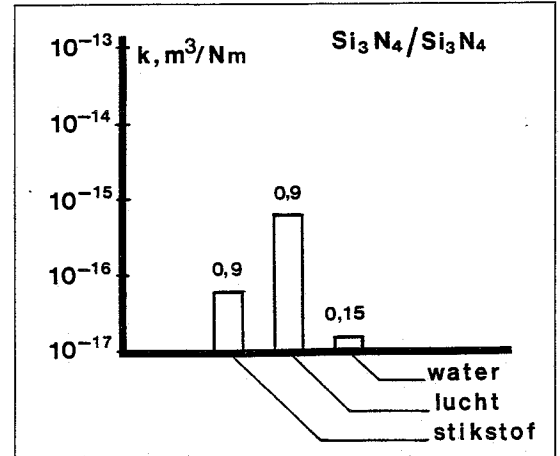
In water vinden we een geheel ander gedrag dan in lucht. Ten eerste blijkt dat nu het onge vulde materiaal zich veel beter gedraagt dan in lucht, naar alle waarschijnlijkheid ten gevolge van een vorm van grenssmering. Toevoeging van PTFE heeft nu echter een negatief effect! Het blijkt dat zich nu geen overgedragen PTFE-film op het tegenloopvlak vormt, terwijl de hechting van de watermoleculen aan het POM-oppervlak (en daarmee de grenssmering) wordt belemmerd door de aanwezigheid van PTFE. Toevoeging van glasvezel doet de situatie nog verder verslechteren.

#### Slijtage siliciumnitride in verschillende media

Het tenslotte te bespreken voorbeeld is terug te voeren op het werk van T. Fischer van het Stevens Institute of Technology in de Verenigde Staten. Sedert enkele jaren neemt het marktaanbod van keramische materialen voor tribotechnische toepassingen sterk toe. Daarbij wordt het begrip "keramisch materiaal" in het algemeen nogal ruim geïnterpreteerd. Zo worden zowel bulkmaterialen, die veelal direct in de gewenste vorm worden gebracht door sinteren, als deklagen op basis van oxyden, nitriden of carbiden, verkregen door opdampen, sputteren of opsputten (vergelijk figuur 4) als keramische materialen aangemerkt. De in tribologisch opzicht interessantste eigenschap van keramische materialen is hun hoge hardheid en het daarmee samenhangende feit dat de microcontacten die ontstaan bij het op elkaar plaatsen van twee keramische oppervlakken, meestal alleen elastisch vervormen. Bij combinatie van twee keramische materialen leidt de hoge hardheid van beide contactpartners en de (vergeleken met metalen) relatief geringe neiging tot bindingsvorming, tot een gunstige situatie t.a.v. adhesieve slijtage. Ofschoon nog wel degelijk adhesiekrachten in het contactvlak optreden, zal adhesieve overdracht van materiaal van een oppervlak naar het andere in het algemeen niet voorkomen (bij combinaties van keramiek en metaal ligt dit duidelijk anders: adhesieve overdracht van metaal naar keramiek is een veel voorkomend verschijnsel).

Helaas leidt de hoge hardheid ook tot een volledig verlies van "conformabiliteit", het vermogen om in een conforme contactsituatie (zoals bijvoorbeeld optreedt in een glijlager) kleine uitlijnfouten op te nemen. Boven-

dien zijn keramische materialen over het algemeen nogal bros waardoor ook onder condities van uitsluitend elastische deformatie, brose breuk in de microcontacten kan optreden hetgeen leidt tot slijtage. Tenslotte bezitten keramische materialen in het algemeen een slechte warmtegeleiding waardoor onder invloed van zich in het contactvlak ontwikkelende wrijvingswarmte, snel hoge contacttemperaturen optreden die degeneratie- en oxydatieverschijnselen kunnen veroorzaken.



Figuur 6: Specifieke slijtagesnelheid  $k$  van Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> op Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> in verschillende media. Beproevingapparatuur: blok op ring. Belasting: 50 N. Glijnsnelheid: 0,1 m/s. Milieu: droge lucht, stikstof of water van 20 °C. Uitgangsruwheid: 0,1  $\mu$ u c.l.a. De getallen boven de balkjes geven de gemiddelde waarden van de wrijvingscoëfficiënt  $f$ .

Mede gezien deze beperkingen komen keramische sintermaterialen in de eerste plaats in aanmerking in "low-stress" abrasie-situaties, zoals die zich bijvoorbeeld voordoen onder condities van abrasieve erosie en bij geleiding van garens, papier, etc. Siliciumnitride Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> is een succesvolle vertegenwoordiger van de groep tribologisch interessante keramische materialen, waartoe ook aluminiumoxyde Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, zirkoonoxyde ZrO<sub>2</sub>, siliciumcarbide SiC, titaancarbide TiC, titaannitride TiN, boriumcarbide B<sub>4</sub>C en boriumnitride BN behoren. In de praktijk wordt het op bescheiden schaal toegepast in wentellagers. In figuur 6 ziet men hoe Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-contacten zich onder betrekkelijk milde beproevingscondities gedragen in een milieu van, respectievelijk, stikstof, lucht en water. Ten eerste blijkt dat de optredende  $k$ -waarden in alle gevallen beneden de "magische grens" van  $1 \cdot 10^{-15}$  m<sup>3</sup>/Nm vallen. Dit is in elk geval opmerkelijk, aangezien verwacht mag worden dat identieke oppervlakken nog vrij sterke restkrachten op elkaar zullen uitoefenen (denk aan het eerder genoemde "ongelijksoortigheidseffect"). Dat dit in stikstof en in lucht ook inderdaad het geval is, volgt uit de relatief hoge waarden van de wrijvingscoëfficiënten, die in die media gemeten worden. Verder blijkt dat uitsluiting van zuurstof een 10-voudige reductie in  $k$ -waarde tot gevolg heeft (d.w.z. van  $6 \cdot 10^{-15}$  m<sup>3</sup>/Nm naar  $6 \cdot 10^{-16}$  m<sup>3</sup>/Nm). Dit is een gevolg van het feit dat in lucht ter plaatse van de microcontacten, oxydatie van het Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> tot SiO<sub>2</sub> plaatsvindt; hetgeen met een aanzienlijke daling van  $S_0$  gepaard gaat. Tenslotte blijkt dat introductie van (belucht) water een verdere aanzienlijke daling in  $k$ -waarde teweeg brengt, te weten in het gegeven voorbeeld tot ca.  $2.5 \cdot 10^{-17}$  m<sup>3</sup>/Nm. Dit gaat gepaard met een aanzienlijke reductie in  $f$ , te weten tot een waarde van 0,15.

Een en ander is een gevolg van het optreden van een milde vorm van corrosieve slijtage waardoor zeer glad-

de contactoppervlakken ontstaan (hoogglanzend gepolijst) en interactie van ruwheidstoppen dus nauwelijks meer optreedt. Bij materialen die slijten via een mechanisme van brosse breuk op microschaal (zoals het geval is bij keramische materialen), draagt dit zeer bij tot reductie in wrijving en slijtage (let op dat dit voor metalen zeker niet zondermeer geldt).

#### **Applicatiegericht onderzoek van materialen (oppervlakken)**

Uit de voorbeelden van de vorige paragraaf blijkt overduidelijk dat men in de tribotechniek op grond van kennis van de mogelijk optredende contactverschijnselen en van de specifieke kenmerken van de aan het tribologisch systeem deelnemende materialen, veel van de waargenomen verschijnselen kan verklaren maar betrekkelijk weinig kan voorspellen, zeker als het gaat om kwantitatieve voorspellingen van het slijtagegedrag van nieuw ontwikkelde materialen. Een en ander heeft als consequentie dat uitvoering van applicatie-gericht, vergelijkend onderzoek een belangrijke plaats inneemt en zal blijven innemen bij de keuze van materialen (lees: oppervlakken) voor tribotechnische toepassingen. Voor een uitvoerige behandeling van dit onderwerp wordt verwezen naar referenties [4] en [5]; ook referentie [6] is relevant. Kort samengevat onderscheidt men in een materiaalkeuzeprocés de volgende stappen :

#### *Analyse van de praktijksituatie*

Hierbij zijn van bijzonder belang de aard (geometrie) van het contact, de contacttemperatuur onder bedrijfsomstandigheden, de samenstelling van het omhullend medium en de smeringstoestand.

#### *Voorselectie van loopvlakmaterialen en (eventueel) smeermiddelen.*

Bronnen hierbij zijn:

- ervaring;
- adviezen en brochures van materiaalleveranciers;
- handboeken;
- tijdschriftartikelen;
- databanken met applicatie-gerichte ingangen;
- expertsystemen.

#### *Keuze beproevingsmethodiek en beproevings-apparatuur.*

Een belangrijke en steeds weerkerende vraag hierbij is: wordt voor de beproeving een laboratoriumapparaat (een "tribometer") gebruikt of beproeft men "in de praktijk"? Grote voordelen van tribometergebruik zijn:

- Men kan bepaalde aspecten van het praktijksysteem accentueren.
- Een tribometer levert over het algemeen goed reproduceerbare gegevens.
- Voor tribometerproeven is in het algemeen relatief weinig proefstukmateriaal nodig.

#### *Uitvoering materiaalbeproevingprogramma.*

#### *Analyse van de resultaten en selectie van materialen voor prototypebeproeving of directe toepassing in de praktijk.*

Een belangrijke vraag hierbij is of men het beste of het goedkoopste materiaal voor de eerste prototypetesten uitkiest. Als men nog enig risico mag lopen, is het laatste vaak het verstandigst!

#### **Relatie tussen ruwheid en tribologische eigenschappen**

Hiervoor werd al duidelijk gemaakt dat krachtoverdracht tussen vaste oppervlakken plaatsvindt via microcontacten die zich vormen ter plekke van interacterende ruwheidstoppen. Dit betekent niet dat er in het algemeen een eenduidige relatie tussen de ruwheid van nieuwe, nog niet ingelopen, contact-

oppervlakken en wrijving en slijtage zou bestaan [6]. De voornaamste reden voor dit gebrek aan correlatie is dat zich onder invloed van de optredende contactprocessen in het algemeen een procesruwheid instelt die onafhankelijk is van de uitgangsruwheid. Voorspelling van deze procesruwheid op basis van primaire materiaalkenmerken is tot op heden niet mogelijk gebleken, zodat men ook in dit geval sterk steunt op applicatiegericht onderzoek.

Contactsituaties, waarin de uitgangsruwheid van ten minste één der contact-oppervlakken gehandhaafd blijft en waarin dus een zekere mate van correlatie tussen uitgangsruwheid en tribologisch gedrag verwacht mag worden, vindt men o.a. in gesmeerde glijlagers (constante asruwheid), wentellagers, bij vormingsprocessen en in kunststof-metaal contacten. In de eerste twee gevallen gaat het in het algemeen om geheel of gedeeltelijk gesmeerde contactsituaties, waarbij de verhouding tussen smeerfilmikte en oppervlakteruwheid aan de orde is [zie bijvoorbeeld ref.7]. In kunststof-metaal contacten vindt men alleen correlaties als geen overdracht van de kunststof naar het metalen tegenloopvlak plaatsvindt [9].

#### **Referenties**

- [1] Tribology - A Glossary of Terms and Definitions, O.E.C.D., Paris 1969, opgenomen in Wear Control Handbook, ASME, 1980, New York.
- [2] F.P. Bowden en D. Tabor, The Friction and Lubrication of Solids, Clarendon Press, Oxford, 1954.
- [3] J.F. Archard, "The temperature of rubbing surfaces", Wear 2, 1959, pag. 438-450.
- [4] A.W.J. de Gee, "Materiaalkeuze in de tribotechniek", M Tijdschrift (België), 29, 1983, nr.1/2.
- [5] A.W.J. de Gee, "Selection of materials for tribotechnical applications - the role of tribometry", Tribology International, August 1978, pag. 233-240.
- [6] C.J. Thijssse, "Tribology aids for designers", in Tribological Design for Machine Elements, Ed. D. Dowson, C.M. Taylor, M. Godet en D. Berthe, Elsevier Science Publishers b.v., Amsterdam, 1989, pag. 495-499.
- [7] A.W.J. de Gee, "Einfluss der Oberflächenrauigkeit auf den Verschleiss in verschiedenen Bereichen der Tribologie", Schmier-technik und Tribologie, 1981, 28/4, pag. 118-124 en 28/5, pag. 156-159.
- [8] D. Landheer, J.P.M. Faessen en A.W.J. de Gee, "A transition diagram for plain journal bearings", Tribology Transactions (S.T.L.E.), 33, 1990, 3, pag. 418-424.
- [9] J.K. Lancaster, "Polymer based bearing materials, the role of fillers and fibre reinforcement", Tribology International, 5, 1972, pag. 249-255.