

Karakterisering en aanzet tot kwantificering van slijtage. Deel 1

Citation for published version (APA):

Landheer, D. (1981). Karakterisering en aanzet tot kwantificering van slijtage. Deel 1. *De constructeur*, 20(9), 64-69.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1981

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

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

Take down policy

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

openaccess@tue.nl

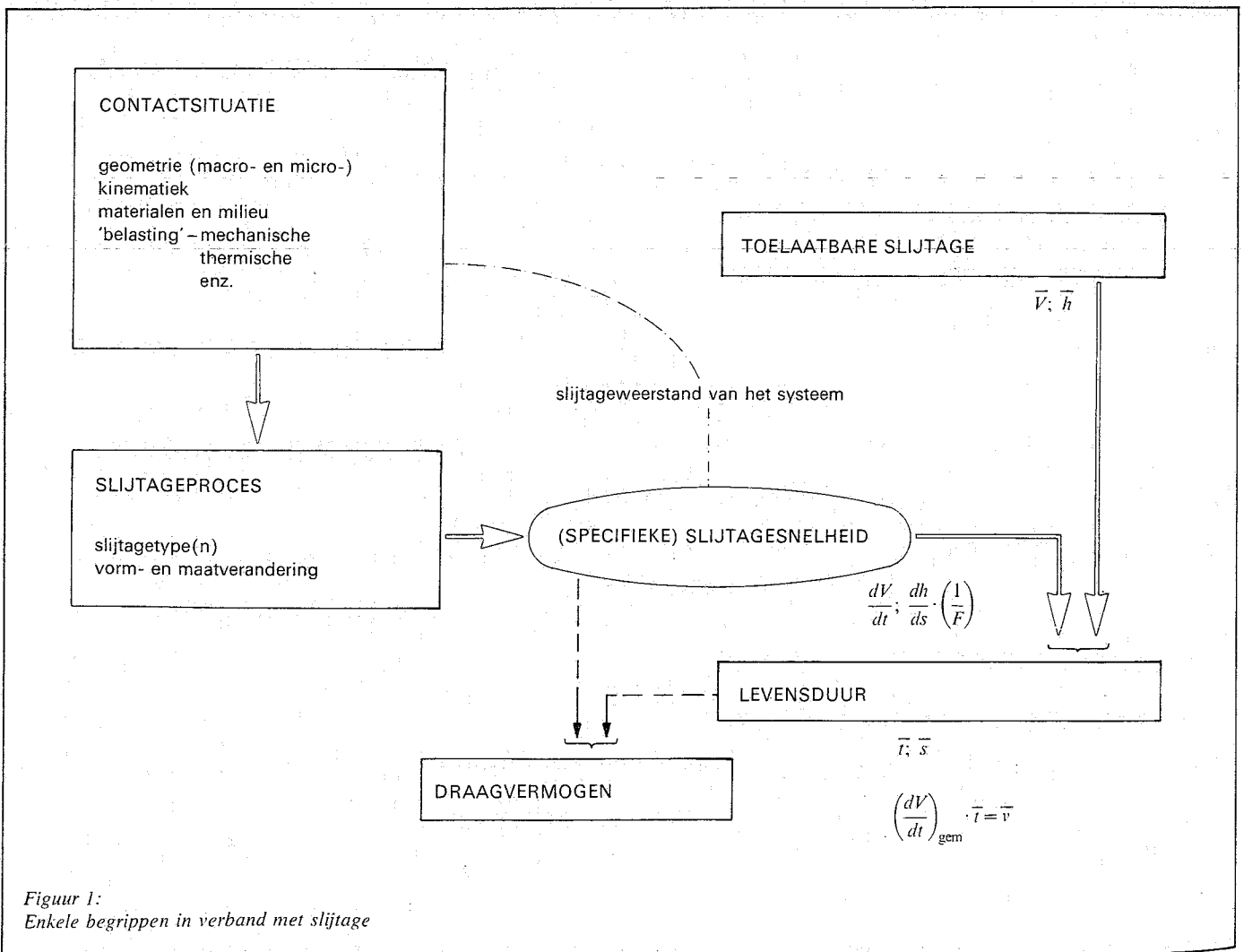
providing details and we will investigate your claim.

Karakterisering en aanzet tot kwantificering van slijtage (1)

Door het slijtagegedrag van een werktuigonderdeel te beschouwen als resultaat van de processen in macro- en microcontactcycli van een tribologisch systeem, kan een aantal slijtagetypen worden onderscheiden. De mechanismen en primaire invloedsfactoren van deze typen worden besproken, waardoor inzicht in de principiële mogelijkheden tot beheersing van het slijtagegedrag ontstaat. Het hele tribo-systeem (materialen, milieu, geometrie, beweging, belasting, enzovoort) blijkt daarbij van belang; constructieve aspecten spelen een essentiële rol. Voor kwantitatieve slijtagevoorspelling zijn tot op heden empirische gegevens onontbeerlijk. In deze artikelenserie wordt een indruk geboden van zowel de aard van de gegevens in de literatuur als de mogelijkheden tot experimentele bepaling ervan. Tenslotte volgt een indicatie voor de aanpak van schadeanalyse. De voornaamste conclusies worden afzonderlijk vermeld.

1. Inleiding: slijtage en levensduur

Slijtage is een zeer algemeen voorkomend verschijnsel met een geweldige invloed in de samenleving. Samen met vermoeiing en breuk vormt het de voornaamste beperking van de levensduur van gereedschappen, werktuigen, constructies en bouwwerken. Schattingen van de economische betekenis leveren zeer grote bedragen op: technisch hoogontwikkelde landen moeten een belangrijk deel van hun inspanningen inzetten voor reparatie of vervanging van door slijtage onbruikbaar geworden goederen [1,2]. In het volgende worden enkele hoofdzaken besproken van mechanische slijtage, dat is de langzame, blijvende verandering van gedaante en afmetingen van een voorwerp tijdens gebruik, als gevolg van glijdende, stotende of rollende aanraking met een tegenmateriaal, eventueel gepaard met fysi-



Figuur 1: Enkele begrippen in verband met slijtage

Inhoudsopgave

1. Inleiding: slijtage en levensduur
2. Tribologisch systeem en contactsituatie
3. Indeling van slijtagetypen
4. Nadere beschouwing van de contactsituatie
 - 4.1 contactcyclus en tribologische belasting
 - 4.2 Eerste indruk van spanningen en vervormingen in een contact
 - 4.3 Elastische of plastische vervorming; aangepaste indruk van het vervormingspatroon
5. Dubbelvlakkige slijtagetypen en hun invloedsfactoren
 - 5.1 Ploegslijtage
 - 5.2 Abrasieve slijtage
 - 5.3 Adhesieve slijtage; vreten
 - 5.4 Oppervlaktevermoeingslijtage
 - 5.5 Corrosieve slijtage
 - 5.6 Schavielslijtage
6. Enkelvlakkige slijtagetypen en hun invloedsfactoren
 - 6.1 Stromingserosie
 - 6.2 Druppelslagerosie
 - 6.3 Cavitatie-erosie
 - 6.4 Abrasieve erosie en abrasie
7. Slijtagesnelheid
 - 7.1 Slijtage-glijweg en slijtage-tijverbanden
 - 7.2 De slijtagesnelheid van loopvlakken
 - 7.3 De waarde van de slijtagefactor voor loopvlakken
 - 7.4 Experimentele bepaling van het slijtagegedrag van loopvlakmaterialen
 - 7.5 Erosieve slijtagesnelheid
 - 7.6 Beperking van geldigheid en betekenis van de berekende slijtagesnelheid
8. Schadeanalyse
9. Conclusies
10. Literatuur

sche, chemische of elektrochemische processen. Oogmerk is daarbij minder een zo groot mogelijke dan een beheerste levensduur: een systeem hoeft slechts – maar dan wel bedrijfszeker – zijn functie te vervullen, totdat vervanging door een technisch of economisch meer geavanceerde variant of afschaffing wegens overstap naar nieuwe activiteiten mogelijk of nodig is.

De levensduur van een slijtend voorwerp wordt bepaald door de slijtagesnelheid en de toelaatbare slijtage samen (schema figuur 1). De in verschillende gevallen toe te laten slijtage hangt van functie, werkingsprincipe en toegepaste constructie af en kan sterk uiteenlopen (potloodstift, autoband, platenspeler-naald, kogellager, zuiger/cilinder). De slijtagesnelheid wordt beheerst door de straks nader te beschouwen contactsituatie.

Al naar behoefte kunnen toelaatbare slijtage en slijtsnelheid uitgedrukt worden in volume, laagdikte en dergelijke, respectievelijk volumetrische of lineaire maat per eenheid van tijd of glijweg, of per omwenteling. Slijtageweerstand is het omgekeerde van de specifieke slijtagesnelheid (dus bij voorbeeld belasting maal glijweg per volume); het begrip kan misleidend zijn, omdat slijtageweerstand geen intrinsieke materiaaleigenschap is, maar slaat op het gedrag in een bepaalde contactsituatie (witmetaal toont bij voorbeeld in een grensgesmeerd glijlager tegenover een gladde stalen as een goede slijtageweerstand, maar is slecht bestand tegen ploegende slijtage, die bij voorbeeld door schuurpapier wordt veroorzaakt).

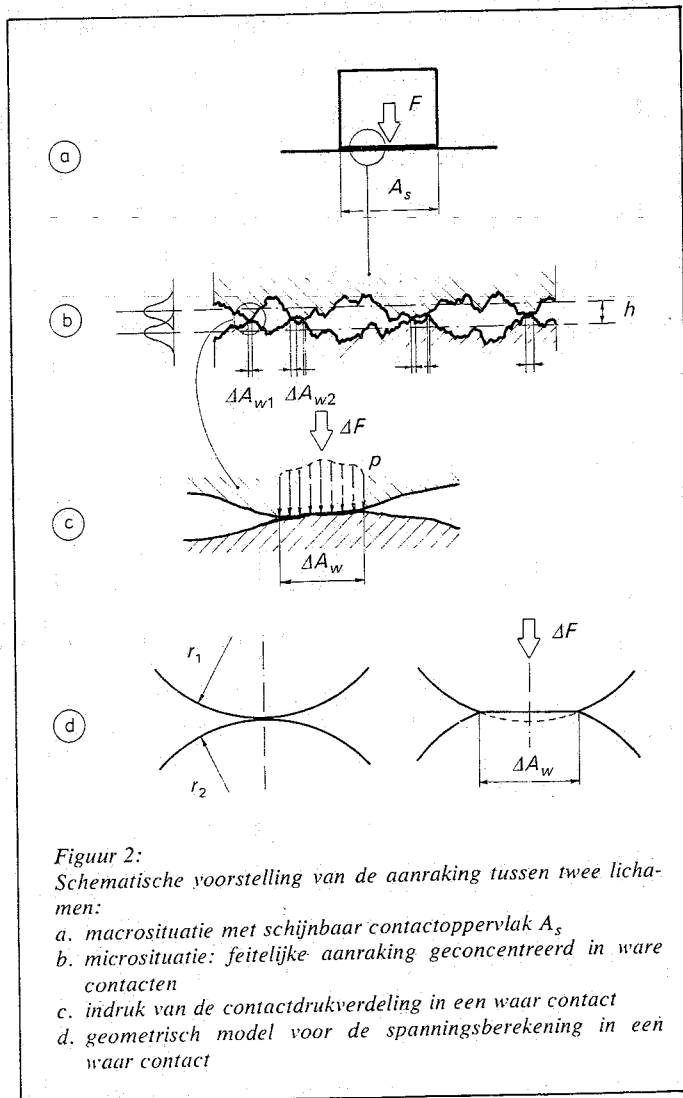
De combinatie van geëiste levensduur en specifieke slijtagesnelheid levert het draagvermogen uit oopunt van slijtage, dat wil zeggen, de gemiddelde belasting die tijdens die levensduur juist gedragen kan worden zonder dat de toelaatbare slijtage wordt overschreden.

Schieten bereikbare levensduur of draagvermogen van een

systeem tekort, dan kan door verandering van de contactsituatie veelal nog aan de eisen voldaan worden (bij voorbeeld grotere afmetingen, andere materialen of andere constructie). Lukt dat niet, dan moet in de constructie met vervangbaarheid van sommige onderdelen rekening gehouden worden (bij voorbeeld 'slijtplaten').

2. Tribologisch systeem en contactsituatie

Slijtage is een contactverschijnsel: een materiaal reageert op de aanraking met een tegenmateriaal. Op microschaal is de aanraking meestal niet continu, maar wegens de oppervlakterutheid verdeeld over een aantal zogenaamde 'ware contacten' binnen het 'schijnbare contactgebied' (figuur 2). De feitelijke contactbeheersing op het materiaal ontstaat in wisselwerking tussen beide contactpartners en het milieu. De respons erop hangt van de lokale toestand van het materiaal af, en wordt dus onder andere beïnvloed door verontreinigingen en temperatuurgradiënten, die zelf weer van het contact afhangen. Slijtagegedrag van een materiaal kan derhalve niet beschreven worden door de eigenschappen van dat materiaal en de macroscopische belasting alléén, maar vraagt beschouwing van het hele 'tribologische systeem': beide contactmakende stoffen én hun omgeving. Ter vergelijking: voor een wegdek maakt het veel uit of zekere belasting erop door een stalen of een rubberen wiel, bij warm droog weer of onder een plensbui wordt overgebracht. Het inzicht, dat slijtage als verschijnsel in een tribologisch systeem moet worden opgevat, kan uitmonden in een systeem-analytische behandeling ervan [3].



Karakterisering en aanzet tot kwantificering van slijtage (1)

Hoe groot de 'omgeving' van het contact is, die tot het tribologisch systeem moet worden gerekend, is moeilijk kwantitatief aan te geven, maar het gaat altijd om het gebied waarmee voor het contactproces relevante wisselwerking bestaat (trillingen, warmtestromen, toevoer van losse deeltjes, enzovoorts). Een adequate beschrijving van de contactsituatie omvat naast het primair te onderzoeken materiaal, het tegenmateriaal en de belasting minstens

- de contactgeometrie
- het bewegingspatroon en de snelheid
- het milieu.

Figuur 3 duidt deze factoren schematisch aan. De hoofdindeling naar geometrie onderscheidt eerst dubbel- en enkelvlaklig

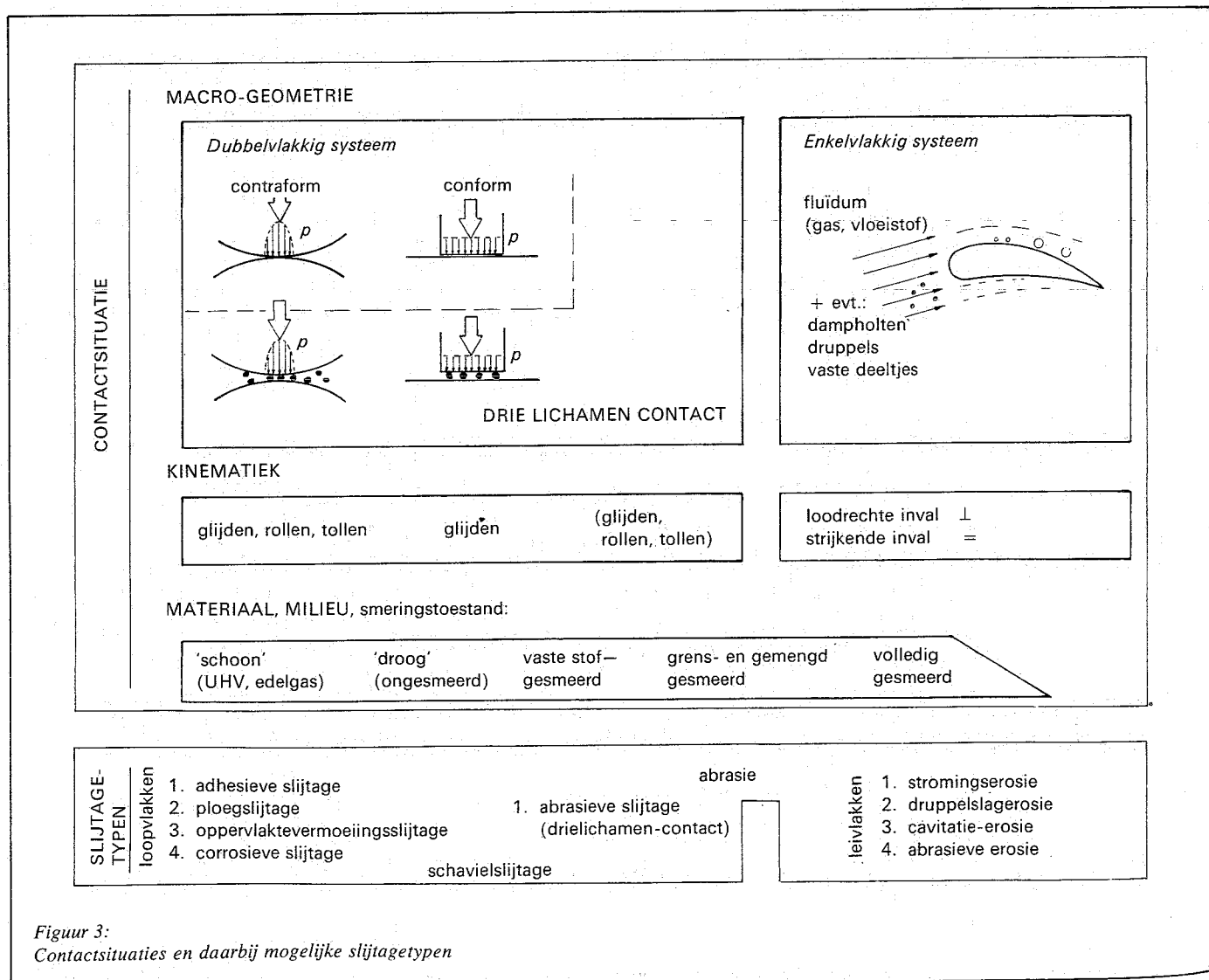
contact (loopvlakken respectievelijk leivlakken, zoals turbine-schoepen, transportbuizen, straalmonden). Het dubbelvlaklig contact kan contraform of conform zijn met geconcentreerde respectievelijk disperse aanraking (tandwielen, nokmechanismen, wentellagers respectievelijk diverse typen glijlagers). Indien de krachtoverdracht tussen de loopvlakken via losse deeltjes verloopt, spreekt men van 'drielichamencontact'.

Bij enkelvlaklig contact wordt een leivlak getroffen door een stromend medium, dat al dan niet continu is. De discontinuïteiten kunnen dampholten in een vloeistof, druppels in een gas of vaste deeltjes in gas of vloeistof zijn. Anders dan bij drielichamencontact worden de partikels nu niet onmiddellijk door een tweede lichaam gesteund. (Het extreem van enkelvlaklig contact: de deeltjes steunen elkaar - zoals een door de grond getrokken ploeg ervaart - kan men zuivere abrasie noemen).

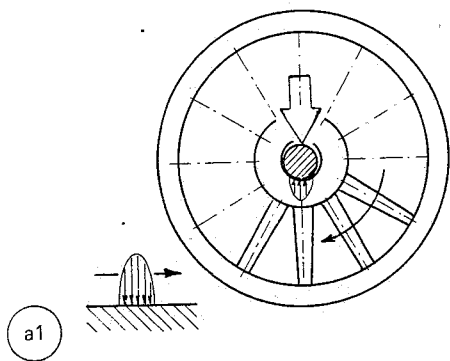
Van het milieu is vooral de fysisch-chemische aard belangrijk, met het oog op interactie met de contactvlakken. Wordt het milieu door een smeermiddel gevormd, dan moet op de mechanisch scheidende werking ervan gelet worden: de rechtstreekse aanraking tussen de loopvlakken kan verminderen of vervallen, terwijl toch de normale belasting doorgeleid wordt (verschillende smeringstoestanden).

3. Indeling van slijtagetypen

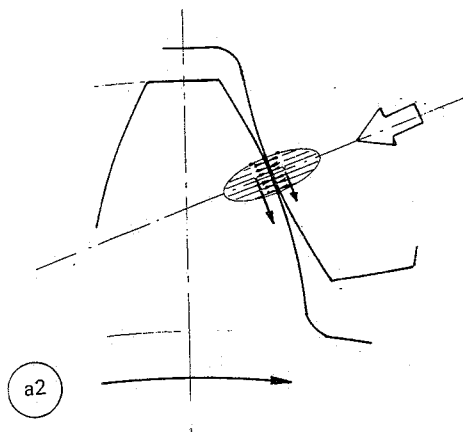
Bij mechanische slijtage gaat het altijd om oppervlakteaantasting onder invloed van het bij de aanraking met het tegenmateriaal optredende krachtenspel. Materiaalverlies van een op-



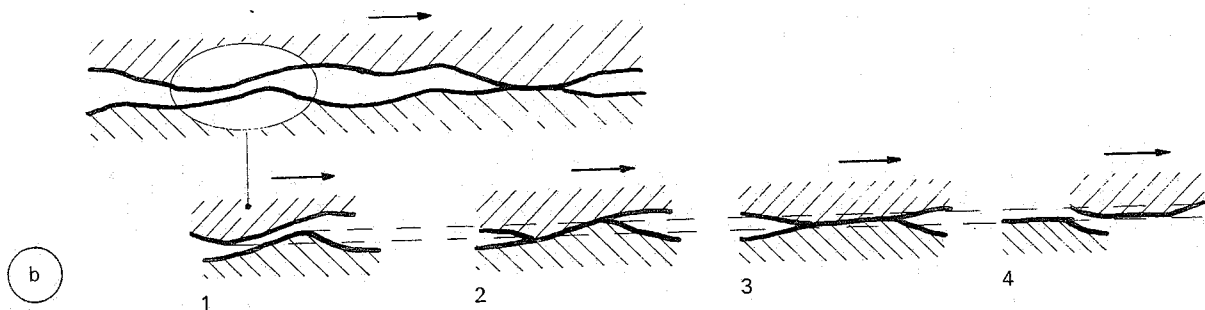
Figuur 3: Contactsituaties en daarbij mogelijke slijtagetypen



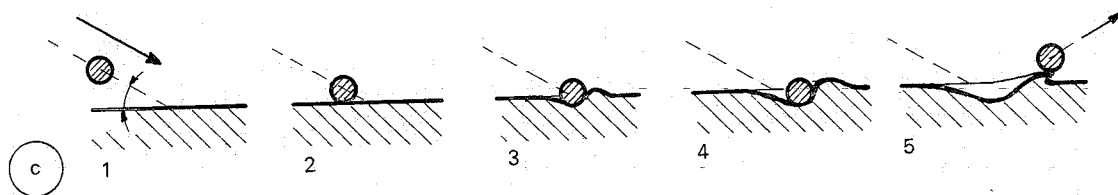
a1
lagering van wagenwiel:
het contact staat stil ten opzichte van de as en loopt
over de binnenzijde van de naaf



a2
aanraking van een stel tandflanken;
tijdens bedrijf verplaatst het contact zich over beide flanken



b
microcontactcyclus bij de aanraking van over elkaar glijdende vaste lichamen



c
contactcyclus bij abrasieve erosie onder schuine deeltjesinval

Figuur 4:
Illustratie van de begrippen macro- en microcontactcyclus

pervlak betekent losmaken van samenhangen, dus breuk, en deze wordt bijna steeds voorafgegaan door enigerlei vervorming. Toch kunnen de factoren die in het krachtenspel domineren en de processen die aan de breuk voorafgaan per geval sterk uiteenlopen. Om over beheersing van slijtage te kunnen spreken is het daarom nodig een aantal slijtagetypen te onderscheiden: pas bij behandeling van het verschijnsel per type kunnen doeltreffend maatregelen ter beïnvloeding worden aangegeven. Een gebruikelijke typenindeling is gekoppeld aan de contactsituatie en wordt aangegeven in figuur 3 (zie verder hoofdstukken 5 en 6).

Hoofdgroepen zijn loopvlak-slijtage en leivlak-slijtage of erosie. Men bedenke dat de genoemde typen wel kunnen worden onderscheiden, maar zelden volledig gescheiden voorkomen. Soms treft men – vooral in de groep van loopvlak-slijtage – nog weleens een verdergaande onderverdeling aan; voor de huidige algemene behandeling is dat minder nuttig. Naast kwalitatieve onderscheidingen zoals hierboven bedoeld, komen ook kwan-

titatieve typeringingen voor (bij voorbeeld: milde, normale of ernstige slijtage), die op verschillende kwalitatieve typen van toepassing kunnen zijn. Men zij voorzichtig met de nomenclatuur bij de typeringen: noem altijd zo veel mogelijk de essentiële verschijnselen (zie voor definities bij voorbeeld [4]).

4. Nadere beschouwing van de contactsituatie

4.1 Contactcyclus en tribologische belasting

Tijdens bedrijf zal het macroskobische of schijnbare contactgebied – of bij een volledig gesmeerd systeem: het conjunctiegebied, dat is het gebied van dichtste loopvlaknadering – zich in het algemeen over één der loopvlakken of zelfs beide verplaatsen (bij voorbeeld: lagering wagenwiel respectievelijk stel tandflanken, figuur 4a). Elementen van een of beide loopvlakmaterialen maken dus telkens een contactcyclus mee, met de daarbij behorende belastingen en vervormingen. Beschouwing van het contactgebied op microschaal leert, dat

Karakterisering en aanzet tot kwantificering van slijtage (1)

ook daar van contactcycli gesproken kan worden: bij relatieve beweging van de loopvlakken ontstaan 'ware contacten' tussen de ruweidsstoppen, ze groeien uit en worden weer verbroken (figuur 4b).

In enkelvlakkige contactsituaties treden – behoudens bij zeer onregelmatige stroming – meestal geen macrocontactcycli op, maar bij discontinuïteiten in het fluïdum zijn wel weer microcontactcycli te onderscheiden (bij voorbeeld: botsing tussen een abrasief deeltje en het leivlak, zie figuur 4c).

De tijdens deze contactcycli optredende materiaalbelasting veroorzaakt de slijtage. Afhankelijk van de verhouding tussen spanningsniveau en materiaalsterkte, wordt reeds tijdens één enkele cyclus een blijvende vervorming of zelfs materiaalverwijdering veroorzaakt, of treedt slijtage pas na meerdere cycli op (een zacht metaal onder glijdend contact met schuurpapier respectievelijk contact tussen kogel en loopbaan in een kogel-lager of druppelslag op een vliegtuigvleugel). Als nu het hele pakket van in de contactcycli op een materiaal uitgeoefende belastingen de 'tribologische belasting' wordt genoemd, dan is uit het voorgaande duidelijk dat de tribologische belasting pas via de totale contactsituatie (systeem van loop- of leivlakmateriaal, tegenmateriaal, milieu, geometrie, bewegingspatroon en snelheid) uit de uitwendige belasting volgt).

4.2 Eerste indruk van spanningen en vervormingen in een contact

De aanraking van twee loopvlakken in een waar contact zou men in ruwe benadering kunnen voorstellen als die tussen delen van twee bollen (vergelijk figuur 2). Zolang de vervormingen elastisch blijven, kan die situatie door toepassing van de elasticiteitstheorie vrijwel volledig beschreven worden: globaal ontstaat het volgende beeld. Onder uitsluitend normale belasting (uitsluitend normale beweging of wrijvingscoëfficiënt = 0) is de contactspanning volgens een ellipsoïde over het contactvlak verdeeld (figuur 5a). In het materiaal onder het contactvlak werken normaalspanningen in drie richtingen en schuifspanningen. De normaalspanningen nemen met toenemende diepte onder het contact af, het schuifspanningsmaximum ligt op enige diepte – omstreeks de halve korte as van de contactelips – onder het contactvlak (zie figuur 5b). De resulterende vervorming van een in onbelaste toestand kubisch materiaalelementje blijkt uit de in figuur 5a geschetste vormen. Als nu het contact zich over het oppervlak verplaatst, doorloopt ieder volume-elementje op de aangegeven diepte de gedaanten 0 tot en met 4.

Indien in het contact ook wrijving optreedt, dan heeft de daardoor veroorzaakte tangentiële belasting een tweetal effecten. In de eerste plaats treedt een afschuiving op – anders dan die ten gevolge van de normale belasting is deze maximaal onmiddellijk aan het contactvlak – zoals geschetst in figuur 5c. Verder worden de normaalspanningen σ_x in de wrijvingsrichting erg belangrijk. Zou de contactschuifspanning τ_x evenredig met de normaalspanning zijn – wat voor macrocontact zeer, maar voor microcontact minder waarschijnlijk is – dan ontstaat daardoor in lichaam II een verloop van σ_x als getekend in figuur 5e: in de rechterhelft van de contactzone drukspanning (het bewegende lichaam I probeert via het contact dit materiaal voort te

duwen), in de linkerhelft trek (het contact probeert materiaal van II hier mee te trekken). σ_x is maximaal aan het oppervlak en neemt in de diepte af; de veroorzaakte vervormingen zijn in figuur 5e aangegeven. In lichaam I ontstaat een tegengestelde situatie.

De normaalspanning in x-richting ten gevolge van de wrijving werkt samen met die, welke door de normale belasting wordt teweegebracht, zodat totaal de in figuur 5f getekende normaalspanningsverdeling resulteert. In een volledige behandeling van de zaak zouden hierbij nog de door de wrijvingswarmte veroorzaakte thermische spanningen opgeteld moeten worden: afhankelijk van de bewegingssituatie kunnen die mee of tegen werken.

Bij verplaatsing van een contact met wrijving over het oppervlak doorloopt het loopvlakmateriaal de in figuur 5f aangegeven cyclus van normaalspanningen in x-richting: eerst druk, later trek, en een totale spanningsamplitude groter dan de maximale drukspanning. Verder is er een cyclisch verloop van normaalspanningen in de andere twee richtingen en van de verschillende schuifspanningen.

4.3 Elastische of plastische vervorming; aangepaste indruk van het vormingspatroon

De beschrijving van het aanrakingsproces is voor macroscopische contraforme contacten (punt- zowel als lijncontact) kwalitatief correct: de constructeur kan en zal er steeds voor zorgen dat de vervormingen elastisch blijven, althans nauwelijks plastisch worden. De met de kleine afmetingen (in de orde van 10^{-3} – 10^{-1} mm) samenhangende belastingsconcentratie op de microcontacten kan daar onder alleen normale belasting al spoedig, en als bovendien sterke tangentiële belasting optreedt nog eerder, (lokale) plastische vervorming veroorzaken. Door te bedenken dat de 'elastische contactdruk' volgens Hertz evenredig is met $E \cdot (\delta/R)^{3/2}$, de 'plastische contactdruk' onder normale belasting in de orde van H_M ligt (vergelijk hardheidsmeting) en dat de gemiddelde toenadering van de ruweidsstoppen op een paar loopvlakken lineair samenhangt met de gecombineerde geometrische midden-ruweheid ρ , is in te zien, dat een criterium voor de aard van het overheersende vervormingstype in ware contacten kan zijn de waarde van de 'elasticiteitsparameter'

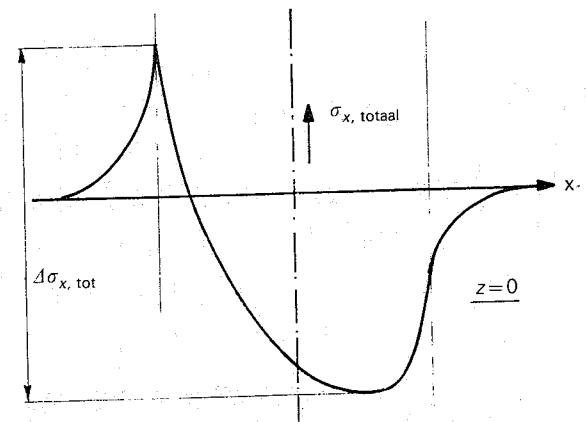
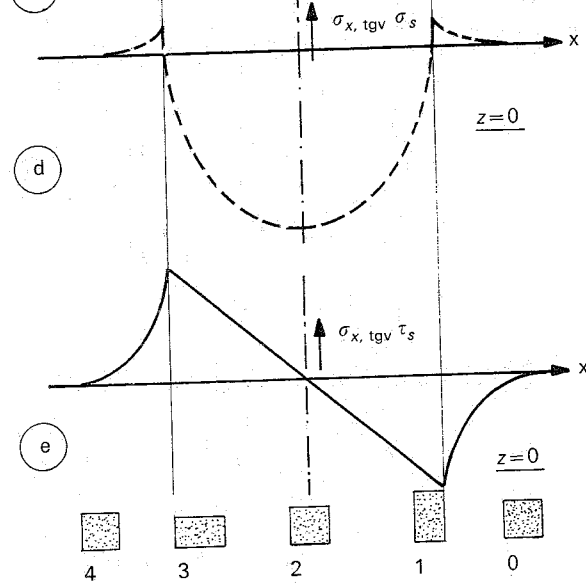
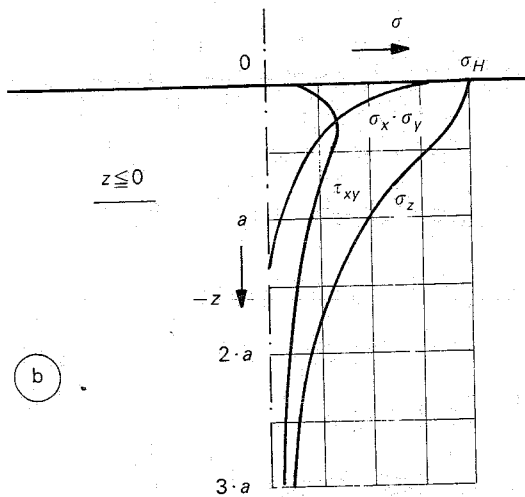
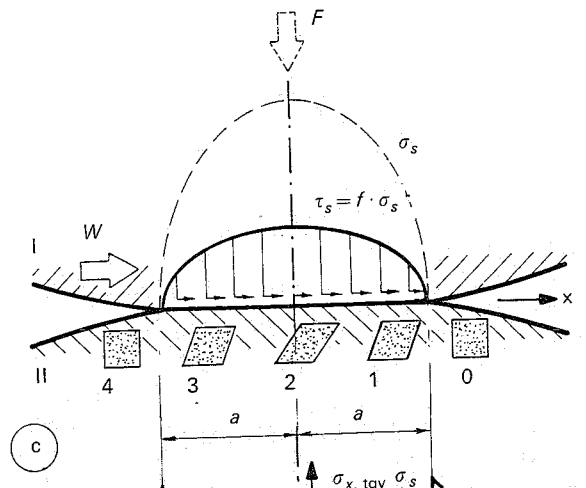
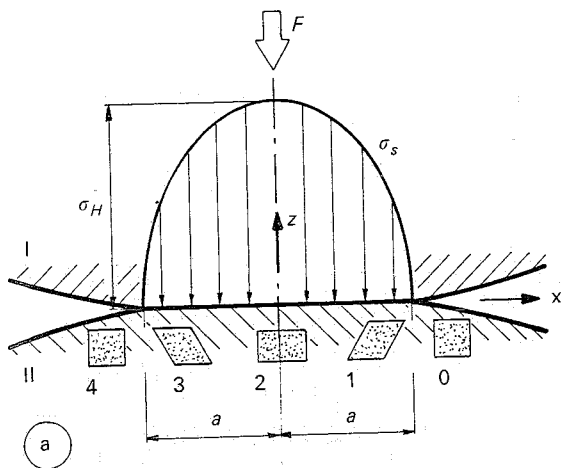
- * $E = 2[(1-\nu_1^2)/E_1 + (1-\nu_2^2)/E_2]^{-1}$ = gereduceerde elasticiteitsmodulus
- H_M = Meijer-hardheid van de zachtste partner
- δ = lokale toenadering in een enkel puntcontact
- R = gereduceerde kromtestraal in een enkel puntcontact
- $\rho = [r_{m1}^2 + r_{m2}^2]^{1/2}$ = gecombineerde r.m.s.-waarde van de loopvlakruweheden
- \bar{R} = gemiddelde gereduceerde kromtestraal in de ware contacten

$$\psi = \frac{E}{H_M} \cdot \left(\frac{\rho}{R}\right)^{3/2} \quad (1)$$

Voor $\psi < 1$ blijven de vervormingen overwegend elastisch en voor $\psi \geq 1$ à 2 wordt een belangrijke fractie van de contacten plastisch vervormd. Dit laatste zal zich dikwijls voordoen als de loopvlakken niet uiterst glad en de materialen niet zeer sterk zijn in vergelijking met de E -modulus.

Bovenstaande houdt in, dat de in hoofdstuk 4.2 gegeven indruk van het contactproces voor de microaanraking veelal niet toereikend is. Echter, hoewel de vervormingen in ware contacten voor een belangrijk deel niet omkeerbaar zijn, is de richting ervan toch wel verwant aan die in het elastisch geval. Daarom kan het geschetste beeld nog steeds gebruikt worden als aanknopingspunt voor het contactproces, alleen zijn de vervormingen – en vooral de afschuivingen – aanzienlijk groter en blijvend. Bovendien is rekening te houden met kans op breuk binnen één contactcyclus in de gebieden met trekspanning. Een bevredigende algemene kwantitatieve behandeling van de plastische processen in contact is onder andere wegens de moeilijkheid van verandering der materiaaleigenschappen met de vervorming nog niet voorhanden.

(wordt vervolgd; literatuuropgave bij laatste deel)



NB: evt. thermo-spanning toe te voegen

Figuur 5:
Indruk van de spanningsverdeling in een elastisch vervormd contact (aanraking tussen twee bolkoppes, vergelijk figuur 2d):

a en b: situatie onder uitsluitend normale belasting (kracht F)
c tot f: resultaat van normale en tangentiële belastingen F en W
(NB: de gespikkelde figuurtjes geven de vervormingstoestand van een aanvankelijk kubisch elementje aan, bij a onder invloed van F , bij c en e onder invloed van W)