

Rapport nr. 89

SLIJTAGE VAN METAALOPPERVLAKKEN

Ir. P.M. van Bommel

Dr. S. L. Mansholtlaan 12 - Wageningen

tel. 08370-3041

Niet voor publikatie bestemd

Rapport nr. 89

SLIJTAGE VAN METAALOPPERVLAKKEN

Ir. P.M. van Bommel

SAMENVATTING

Bij bewegende machinedelen is adhesieve slijtage de meest voorkomende vorm van slijtage. Vermindering van deze slijtage kan bereikt worden door verhoging van de hardheid van het metaal. Daar tijdens het slijtageproces versterking (work-hardening) van het metaal optreedt, heeft verhoging van de hardheid door versterking (tijdens het fabricageproces) geen nut.

Het inloopproces moet gezien worden als een combinatie van vermindering van de oppervlakteruwheid en van versterking van het materiaal.

Adhesieve slijtage kan tevens verminderd worden door het aanbrengen van oppervlaktelagen, hetgeen doorgaans alleen nut heeft tijdens het inloopproces. Deze oppervlaktelagen kunnen ook gevormd worden tijdens het lopen van de machine met behulp van doops, die aan de smeerolie worden toegevoegd.

Erosieve slijtage kan verminderd worden door het kiezen van metaaloppervlakken, die harder zijn dan de eroderende korrels. De kunst is, om deze deklagen aan te brengen op een voldoende sterke ondergrond.

Corrosieve slijtage kan bestreden worden door toevoeging van doops aan de smeerolie (of het koelwater). Dit zijn veelal basische verbindingen.

Oppervlaktevermoeiing, met putvorming (pitting) als resultaat, kan soms verminderd worden door gebruik van een zeer dikke smeerolie. Doorgaans dient een harder materiaal gekozen te worden, waarbij echter gewaakt dient te worden voor interne spanningen.

Cavities kan soms sterk verminderd worden door de hierbij optredende corrosie te beperken. Doorgaans vraagt het verschijnsel echter een constructieve (vormgevings-)oplossing, terwijl de eigenschappen van de gebruikte materialen van weinig invloed zijn.

Door het Koninklijk Instituut van Ingenieurs werd, in samenwerking met de Bond van Materialenkennis, een leergang "Slijtage" (speciaal gericht op de slijtagebestrijding door middel van oppervlaktebehandeling) georganiseerd. De leergang werd gegeven op de Technische Hogeschool Eindhoven op 17 en 18 januari 1967. Enkele belangrijke punten uit deze leergang worden hieronder vermeld. De volledige tekst van de leergang is aanwezig in de bibliotheek van het I.L.R. en wordt bovendien binnenkort gepubliceerd in "de Ingenieur".

Degenen, die wel eens een ruwheidsgrafiek van een metaaloppervlak hebben gezien (gemaakt met behulp van het Talysurf apparaat), hebben een beeld in gedachten van een zeer ruw "berglandschap" met uitermate steile wanden. Dit beeld is misleidend, want het apparaat vergroot de afmetingen (bijv.) verticaal 10.000 maal en horizontaal slechts 100 maal. In deze verhouding is dan de hoogte van de toppen respectievelijk de diepte van de dalen boven en beneden het gemiddelde ongeveer gelijk aan of slechts enkele malen groter dan de breedte van de voet in top of dal. Brengt men de figuur tot zijn juiste proporties terug, dan blijkt de hoogte van de bergen 0,01 à 0,03 maal de breedte van hun voet te zijn. Anders gezegd: een geslepen oppervlak heeft toppen van omstreeks 0,1 micron (boven het gemiddelde oppervlak) op een gemiddelde onderlinge afstand van omstreeks 10 micron. Het zijn deze toppen, die elkaar raken wanneer er metallisch contact plaatsvindt. Slijtage, die het gevolg is van dit metallisch contact, kan als volgt verlopen: vorming van adhesieverbindingen, d.w.z. vorming van (koude of warme) lassen, die even later weer losgerukt worden;

erosie of abrasie ten gevolge van schurende werking van harde deeltjes tussen de metaaloppervlakken of tegen een metaaloppervlak (grondbewerking!);

corrosie, in samenwerking met mechanisch contact, waardoor corrosieproducten afgewreven worden;

oppervlaktevermoeiing door hoge cyclische belastingsvariaties.

ADHESIEVE SLIJTAGE

Daar het metallisch contact wordt overgebracht door een klein aantal "puntcontacten", zijn de contactdrukken ter plaatse uitermate hoog. Bij onderlinge beweging van de oppervlakken treedt deformatie op, die enerzijds leidt tot versteviging (work-hardening) van een zone rondom de contactplaats, anderzijds tot aaneenlassen van de contactplaatsen. Deze las kan een "koude las"

zijn bij langzame beweging en hoge contactdruk, maar zal een smeltlas zijn bij hoge bewegingssnelheid.

De verstevinging rondom de contactzone heeft tot effect, dat de lasverbinding afbreekt langs de grenszone tussen verstevigd en moedermateriaal. Hoe dieper dus de verstevinging doordringt (functie van contactdruk en materiaaleigenschappen), des te groter zal het uitgerukte stuk metaal zijn. Deze losgerukte stukjes veroorzaken op hun beurt abrasieve slijtage.

Daar de vorming van een las een functie is van inter-atoomkrachten tussen de twee bewegende metalen, zal slijtage beperkt worden door toepassing van metalen, die niet in elkaar oplossen, of door het aanbrengen van relatief dikke huiden van oxyden of andere chemische verbindingen, die ervoor zorgen dat een (smelt)las niet gevormd wordt, of leiden tot de vorming van een zeer broze las, die gemakkelijk losbreekt. Dergelijke bedekkingen kunnen zowel van tevoren aangebracht worden (fosfateren, sulfoneren) als tijdens het lopen van de machine gevormd worden (opname van zuurstof of stikstof uit de lucht, toevoeging van zwavel-, fosfor- of chloorverbindingen aan het smeermiddel).

Opgemerkt moge hier worden, dat volledige hydrodynamische smering metallisch contact opheft, waardoor de slijtage tot nul daalt en de aard van de metaaloppervlakken geen enkele rol meer speelt. Dat "in de praktijk" de keuze van de metaalcombinatie zo belangrijk is, ligt dan ook in het feit, dat zich steeds omstandigheden voordoen, waarbij de smering niet volledig hydrodynamisch is. Voorbeelden: starten en stoppen bij lagers, ongunstige omstandigheden voor de opbouw van een smeerfilm bij hypoid- en wormoverbrengingen.

Opgemerkt werd, dat het metallisch contact leidt tot verstevinging (work-hardening) van de oppervlaktelaag. Men kan dan ook het inloopp proces zien als een combinatie van "wegpoetsen" van de hoge toppen en verstevinging van het gehele metaaloppervlak. Na het inlopen is (dus) het gehele metaaloppervlak "verstevid", zodat het formaat van de weggebroken stukken belangrijk kleiner is dan tijdens het inloopp proces. Theoretisch zou in het geheel geen (adhesieve)slijtage optreden, wanneer de gevormde lassen weer zouden afbreken op de plaats, waar zij gevormd zijn.

Verloopt het inloopp proces in een te hoog temperatuurgebied (te hoge belasting of toerental van het onderdeel), dan treedt geen verstevinging van het metaaloppervlak op, maar uitgloeien. Dit kan (plotseling) vreten van de metaaloppervlakken veroorzaken. Dergelijke vreetplekken vindt men vaak op de zuigermantels van motoren, een bewijs dat plaatselijk en tijdelijk de

temperaturen extreem hoog zijn geweest.

Ijzer (bijv. zuigerveer) kan een faseverandering te zien geven ten gevolge van hoge lastemperaturen, waardoor zich een austenitische, zeer harde, oppervlaktelaag vormt. De plaatselijke temperaturen zijn dan boven 800°C geweest. Daar austeniet zeer "onreactief" is, hecht smeerolie zich slecht aan het materiaal. Deze harde laag veroorzaakt in dit geval vreten van de bewegende delen. Inzet-harden (carbureren) heeft dan ook vaak een ongunstig effect: het oppervlak kan zeer veel austeniet bevatten en daardoor "moeilijk te smeren" zijn.

Uit de leergang blijkt zeer duidelijk, dat men pas sinds kort een duidelijk inzicht heeft in de invloed van oppervlaktebehandelingen, hetgeen leidt tot geheel nieuwe ontwikkelingen op dit gebied.

Slijtage kan verminderd worden door de hardheid van het metaal te verhogen. Deze grotere hardheid dient verkregen te worden door veranderingen in de chemische samenstelling van het metaaloppervlak en niet door versteviging, omdat het verstevigingsproces tijdens het lopen van de machine plaatsvindt. Anders gezegd: de hardheid van het materiaal in verstevigde toestand is bepalend voor de slijtage. Een andere zaak is, dat een zacht lager zich kan aanpassen aan de vorm van de as en harde deeltjes door inbedden kan opnemen. De, in het lager draaiende, as dient dan echter harder te zijn dan de ingebedde deeltjes, opdat deze deeltjes geen abrasieve slijtage veroorzaken. Verder dient het lagermateriaal niet oplosbaar te zijn in het metaal van de (stalen) as. De volgorde in de richting van sterkere vreeteigenschappen is voor lagermaterialen bij gebruik van een stalen as: tinbabbit, loodbabbit, tin-aluminium legering, loodkoper, loodbrons, zilver, brons. De dikte van het lagermateriaal heeft een grote invloed op de draagkracht van het lager. Een tinbabbitlaag van 50 tot 75 micron heeft bijv. een vijfmaal hogere levensduur dan een van 750 micron. De dunne laag laat zich echter weinig of niet meer vervormen, waardoor het aanpassingsvermogen aan de vorm van de as en het inbedvermogen voor vuil veel geringer is. M.a.w. aan de nauwkeurigheid van bewerking worden hogere eisen gesteld, evenals aan de vuilafdichting.

Oppervlaktelagen, die een bescherming van korte duur (bijv. de inlooptijd) geven, zijn o.a. fosfaatlagen. Zij geven dan echter een zeer goede bescherming tegen vreten, waardoor bijv. in het vierkogelapparaat de belasting tot het tienvoudige kan worden opgevoerd (ten opzichte van onbehandelde stalen kogels) voordat vreten optreedt. Hier dient echter opgemerkt te worden, dat

het normale kogellagerstaal een vrij sterke neiging tot vreten vertoont, die met een factor vier verminderd kan worden door over te gaan op kogels van gehard (chilled) gietijzer. De bescherming, die een fosfaatlaag op dit hardere materiaal geeft is, zoals te verwachten, niet beter dan bij het normale kogellagerstaal. De dikte van de fosfaatlaag heeft echter wel een grote invloed (het duurt langer voordat de laag weggeveven is).

Natuurlijk gevormde oxydelagen geven, evenals chemisch gevormde (E.P. toevoegingen aan de smeerolie) of galvanisch neergeslagen lagen, een goede bescherming tegen vreten. Belangrijk is, dat zij opgebracht zijn op een harde onderlaag. Wanneer de onderlaag zacht is, breken zij los en kunnen leiden tot sterke verhoging van de slijtage.

Grafiet en molybdeen disulfide kunnen een effectieve "noodsmering" geven, waarbij vooral het hoge temperatuurgebied (waar smeerolie tekort schiet) van belang is. Voor molybdeen disulfide is dit het gebied van 200 tot 500°C (daarboven ontleedt het) en voor grafiet van 500 tot 800°C.

Deklagen als lood (soms galvanisch aangebracht, soms in de vorm van loodnaftenaat aan de smeerolie toegevoegd) geven kortstondig bescherming, waarbij het lood als gemakkelijk afschuifbare smeerfilm werkt. Chroom echter is zeer hard maar moet op een harde ondergrond worden aangebracht. De chroomlaag is een slechte ondergrond voor smeerolie, maar wordt toch wel in niet-poreuze vorm voor vliegtuigmotorcilinders gebruikt (0,1 mm dik of dunner), terwijl ook zuigerveren doorgaans een niet-poreuze chroomlaag hebben. Voor cilinders van dieselmotoren kiest men dikkere lagen (tot 0,75 mm) die, door stroomomkeer in het galvanisch bad, poreus zijn gemaakt.

Chroom is, door zijn hardheid, goed bestand tegen adhesieve en abrasieve slijtage, maar is niet bestand tegen corrosie. Verchromde cilindervoeringen hebben ook alleen dan succes, wanneer het chroom tegen corrosie beschermd wordt door doops in de smeerolie, die het uit de brandstof gevormde zwavelzuur neutraliseren. Verder vertoont een chroomlaag vaak haarscheurtjes, die tot scheurtjes in de onderlaag kunnen leiden.

Striplagers bestaan vaak uit een stalen schaal, bekleed met koperlood (0,25 - 0,50 mm dik) en afgedekt met een loodlaag van 20 micron dik. Het lood heeft goede noodmeereigenschappen, maar is zeer corrosie-gevoelig. Legeren met 5 % indium of tin heeft succes, maar deze componenten diffunderen bij de bedrijfstemperatuur in de motor vrij snel naar de grenslaag tussen lood en koperlood. Dan is niet alleen de loodlaag weer corrosiegevoelig, maar is tevens ruw geworden, waardoor zijn draagkracht vermindert. De gevormde, harde, koper-tin of koper-indium laag op het grensvlak bevordert bovendien afpellen

(spalling) van de loodlaag, hetgeen desastreuze gevolgen kan hebben. Effectief is een "damlaag", dik $1/4$ micron, van galvanisch neergeslagen nikkel op de koper-lood laag, voordat de loodbedekking wordt aangebracht. Men ziet, hoe "verfijnd" de techniek langzamerhand wordt.

EROSIEVE EN ABRASIEVE SLIJTAGE

Erosie (en abrasie) treedt op, wanneer het beschouwde metaaloppervlak zachter is dan de eroderende korrels. De slijtage wordt hoger, naarmate het hardheidsverschil tussen metaal en korrels groter is. Daar ook bij erosie een versterkingsproces optreedt, biedt het verhogen van de hardheid van het metaal door versterking geen voordeel. Daar het versterkingsproces bij erosie veel langzamer verloopt dan bij adhesieve slijtage, kan de slijtage in de aanvang vrij sterk zijn om na enige tijd tot een veel lager niveau te zakken wanneer het materiaal zijn "versterkte hardheid" heeft bereikt. Slijtage door een (korrelvrije) gas- of vloeistofstroom is in wezen een corrosieve slijtage, waarbij de corrosieproducten door de stroom (versneld) worden afgevoerd.

Stoaterosie treedt op, wanneer de korrelstroom het metaaloppervlak (praktisch) loodrecht treft. In dat geval slijt een elastisch oppervlak (rubber) belangrijk minder dan een hard oppervlak (staal). Ook cavitatie-erosie valt in deze hoek, gecombineerd met corrosie door "schoonspoelen" van het metaaloppervlak.

Stof en zand hebben een hardheid van $800-1.000 \text{ kgf/mm}^2$, dus moet het metaal liefst harder zijn (afgezien van stoaterosie). Hiertoe behoren cementiet (Fe_3C) met een hardheid van 840, verder chroomcarbiden (Cr_{23}C_6) 1.650 en titaancarbiden (TiC) 3.200. Soms kan men zich redden met zachte lagen, waarin de korrels zich inbedden, zodat zich een "natuurlijk hard" oppervlak vormt. Dit werkt alleen wanneer de optredende krachten (resp. snelheden) niet dusdanig hoog zijn, dat de korrels weer losgescheurd worden.

Uit slijtageproeven in verschillende grondsoorten blijkt, dat de zaak niet zo eenvoudig is als uit het voorgaande kan worden geconcludeerd, namelijk: "kies een materiaal, dat harder is dan de betrokken grondsoort en slijtage zal niet optreden".

De hardheid van silicium carbide is $3.000 \text{ (kgf/mm}^2)$, die van corundum 2.160, die van granaat 1.360, die van vuursteen (kwarts) 1.060, die van glas 590. In de stengels van vele planten komen kwartskristallen voor.

Een typisch materiaal, gebruikt voor grondbewerkingswerktuigen, is silicomangaan staal met een hardheid van 500. Dit is belangrijk zachter dan kwarts (zand).

Hardmetaal deklagen hebben soms weinig effect, omdat zeer hoge contactdrukken optreden (speciaal bij de aanwezigheid van stenen in de grond) en het matrix metaal onder de optredende krachten vervormt. Zelfs bij gebruik van carbiden, harder dan 2.000, is het resultaat in steenhoudende grond nauwelijks beter dan bij gebruik van een normale perlitische (witte) gegoten ijzersoort.

Gedacht wordt thans aan gelaagde onderdelen, opgebouwd uit aan elkaar gelijmde dunne platen. Hiervan kan bijv. de (dunne) dekplaat een uitermate hoge hardheid hebben, om een goede snijkant te behouden.

CORROSIEVE SLIJTAGE

Corrosie, ondersteund door wegpoetsen van de slijtageprodukten. Desastreus in dieselmotoren bij gebruik van brandstof met hoog zwavelgehalte. Zoals in een vorig hoofdstuk reeds werd opgemerkt, geeft chroom geen bescherming in deze gevallen. Met behulp van sterk basische **toevoegingen** aan de smeeroilie kan echter zeer veel bereikt worden.

Corrosieve slijtage is over het algemeen een "mild" verlopend proces, waarbij adhesieve slijtage (uitrukken van deeltjes) achterwege blijft. In sommige gevallen bevordert men bewust de corrosieve slijtage (E.P. toevoegingen van smeeroilie) om adhesieve slijtage te voorkomen. De chemische reacties vinden plaats in het hoge temperatuurgebied, dat door de vorming van adhesiepunten gecreëerd wordt en zij voorkomen dan daar de vorming van een las en het uitrukken van materiaal.

Ook cavitatie-slijtage wordt veelal gedeeltelijk door corrosie veroorzaakt en kan dan ook sterk verminderd worden door toevoeging van inhibitoren of emulgeerbare olie aan het koelwater van motoren (indien het althans gaat om cavitatie in de koelwaterruimte). Cavitatie-verschijnselen treden echter ook op in een niet-corrosief milieu en kunnen dan vergeleken worden met stoot-erosie. Immers het samenklappen van, tegen de metalen wand gevormde, cavitatiebellen veroorzaakt hoge stootkrachten ter plaatse. Het cavitatie-verschijnsel zelf wordt veroorzaakt door mechanische trillingen van hoge frequentie en/of plaatselijke drukken in de vloeistof, die dicht bij de absolute nuldruk komen.

Voorbeelden: trillende cilindervoeringen van motoren, waarbij dan op het contactvlak tussen metaal en koelwater cavitatie optreedt. Zuigopeningen van pompen waar (bijv. door hoge aanzuigweerstand) een zeer lage druk heerst.

OPPERVLAKTE VERMOEIJING

Hoge cyclische spanningsconcentraties, bijv. in kogellagers, op tandflanken van tandwielen, op contactvlakken tussen nokas en klepstoter. Hierdoor ontstaan scheurtjes onder het oppervlak, die leiden tot uitbreken van stukjes (putvorming, pitting).

Smering geeft zelden uitkomst in deze gevallen, omdat ook hoge drukken in de smeerfilm tot scheurtjes kunnen leiden. Indien het mogelijk is om de viscositeit van het smeermiddel (bij bedrijfstemperatuur!) belangrijk te verhogen, wordt de contactdruk over een groter oppervlak uitgespreid, waardoor de vermoeiings-levensduur van het metaal wordt verlengd. Doops geven geen uitkomst (ook $M\circ S_2$ of grafiet niet) en kunnen zelfs leiden tot versnelling van het proces door het bevorderen van interkristallijne corrosie. Onzuiverheden in het metaal (dicht onder het oppervlak) versnellen de scheurvorming in hoge mate. De oppervlakteruwheid heeft tevens een grote invloed: het ruwe oppervlak heeft plaatselijk hogere contactdrukken. Oppervlaktebehandelingen (verandering van de metaalstructuur) hebben soms een averechts effect, omdat zich hierdoor interne spanningen kunnen opbouwen. Ook de hechting van de oppervlaktelaag aan de ondergrond is van groot belang.

Doops in het smeermiddel kunnen adhesieve slijtage belangrijk verminderen, maar hebben geen effect bij oppervlaktevermoeiing noch bij abrasieve slijtage.