

Navorsings- en Oorsigartikels

'n Ontleding van die wrywingsmeganisme op remstelsels van spoorwegvoertuie

J.H. Barnard

Besturende Direkteur, Metpro-Ontwikkelingsmaatskappy, Pretoria

UITTREKSEL

Wrywingsenergievernietiging by 'n tussenvlak betrek 'n groot verskeidenheid interdisiplinêre begrippe. Na gelang hoër snelheidsvereistes aan spoorvervoer gestel is, is steeds groter probleme met die tradisionele gietyster as remmateriaal ervaar. Verbeterings is verkry met ander wrywingsmateriale, maar slegs deur 'n diepgaande ontleding te maak van die komplekse interaksies wat plaasvind tussen remblok en rempad, kon die probleme wat met samegestelde remblokmateriaal ondervind is, opgelos word. Die artikel behandel sekere van die probleme wat met die ouer materiale ondervind is en dui aan hoe die probleme oorkom is deur die begrip en aanwending van nuwe tegnieke wat voorheen nie met die remming van spoorbaanvoertuie vereenselwig is nie.

Twee samestellings, naamlik 840/N, van toepassing op lokomotiewe en goederewaens waar massa-georiënteerde momentum oorheers, asook die hoë-wrywingsamestelling 655/C vir passasiersrytuie met snelheid georiënteerde momentum, word tans gebruik.

ABSTRACT

An analysis of the friction mechanism on brake gear of railway rolling stock

Friction energy dissipation at an interface involves a wide range of interdisciplinary concepts. As the demand for higher operating speeds increased, the limitations of cast iron as the traditional friction material for rail transport brakes became more apparent. Only through an intensive analysis of the interfacial interaction between the brake block and brake path could the problems encountered with other promising friction materials be solved. The article deals with the difficulties pertaining to the early composite materials, and indicates how these were overcome by the understanding and implementation of new techniques not previously associated with conventional systems connected with railway braking.

Two composite materials, that is 840/N for locomotives and freight wagons where mass oriented momentum dominates, and high friction composite 655/C for passenger vehicles with a predominantly speed-oriented momentum, are presently used.

1.00 INLEIDING

Baie energie word steeds wêreldwyd bestee aan nuwe beginsels om treine en ander swaar voertuie vanaf hoë snelhede tot stilstand te bring teen hoër vertragingstempo's as wat tevore moontlik was. Die eenvoud en betroubaarheid van die ou beginsel van tussenvlakwrywing is met verloop van tyd toenemend bemoeilik deur beperkende vereistes ten opsigte van remvermoë, slytasie, hitte-ontwikkeling, geraas, kapitaal- en instandhoudingsuitgawes.

Vanuit vreemde dissiplines, totaal buite die tradisionele terrein van die spoorwegingenieurswese, is onderstaande inligting versamel, ontleed, aangepas en ontwikkel om uiteindelik 'n tussenvlakwrywingsmeganisme te skep wat deur middel van transpirasieverkoeling weerstand bied teen dieselfde orde wrywingshitte-intensiteit en -duur as wat onder die strafste toestande van toepassing is, naamlik by die neusdopdeklag van 'n missiel op sy terugroete deur die aarde se atmosfeer.¹

Bykomstig tot die piroliseringsproses deur wrywing en gepaardgaande transpirasieverkoeling van die remvlak, word 'n bewapende, selfversorgende, vlamdigtingsemulsie geskep om aan al die noodsaaklik hoë-temperatuur tribologiese en reologiese vereistes te voldoen ten opsigte van 'n stabiele visko-elastiese wrywingswisselwerking sonder enige eksotermiese reaksie.

In die slotsom word die bevindings weergegee ten opsigte van hoë wrywingsinsette wat bereik is gedurende die afgelope ses jaar op snelbewegende treine deur middel van die transpirasieverkoelde samestelling 655/C. Omdat beide polimeer-oriëntering sowel as -pirolisering teenwoordig is binne die tussenvlak, bied die moontlike aanwending van hoogsgelidende PANP²-plastiek 'n verdere uitdaging en blyk dit dat die moontlikheid nou reeds bestaan dat die meeste snelbewegende treine van die toekoms deur wrywing op hulle remvlakke gerem sal kan word teen 'n intensiteit wat in sommige gevalle

sels $1,9 \text{ kW/cm}^2$ oorskry, terwyl die wiel-tot-spooradhesie-probleme, eie aan skyfremstelsels, nie meer 'n faktor sal wees nie.

1.10 EIENSKAPPE VAN DIE WRYWINGSKOËFFISIËNT VAN GIETYSSTERREMBLOKKE

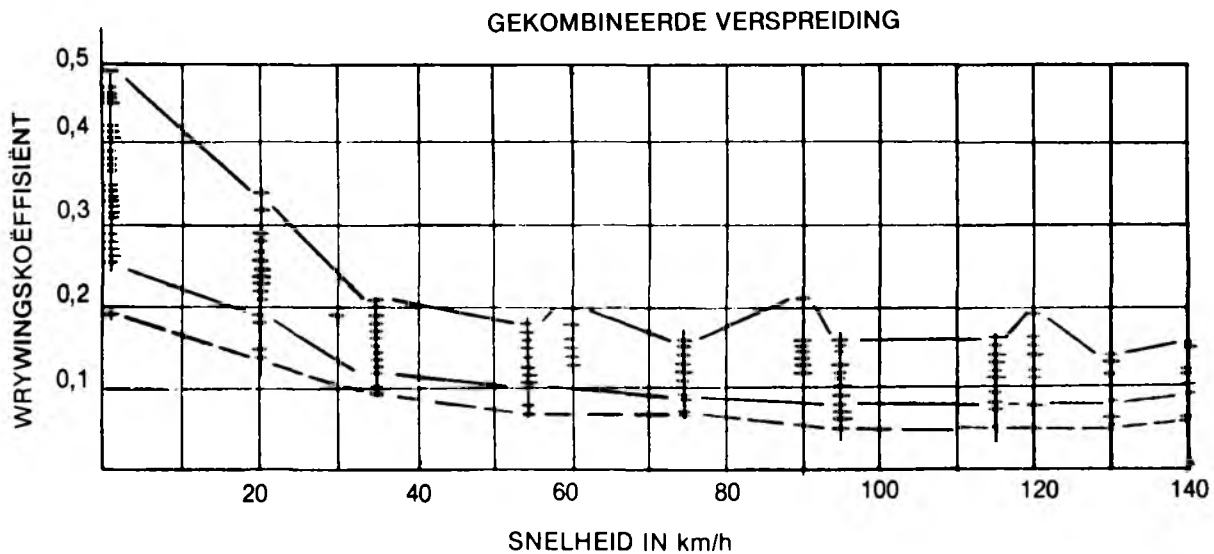
1.11 'n Gietysterremblok se hoë gevoeligheid vir tussenvlakdruk sowel as rempadsnelheid maak remaanwendings, veral op baie lang treine, uiters moeilik. Volgens toetse deur Knorr, Fig. 1(a), Oktober 1955, op remblokke volgens spesifikasie van die Deutsche Bundesbahn wissel die wrywingskoëffisiënt prakties van 0,05 by 1175 kPa en 100 km/h tot 0,48 by 294 kPa en 2 km/h .

1.12 Knorr se toetse, Fig. 1(b) en (c), dui verder daarop dat die remkrag afneem by snelhede tussen 100 en 120 km/h met vermeerdering in

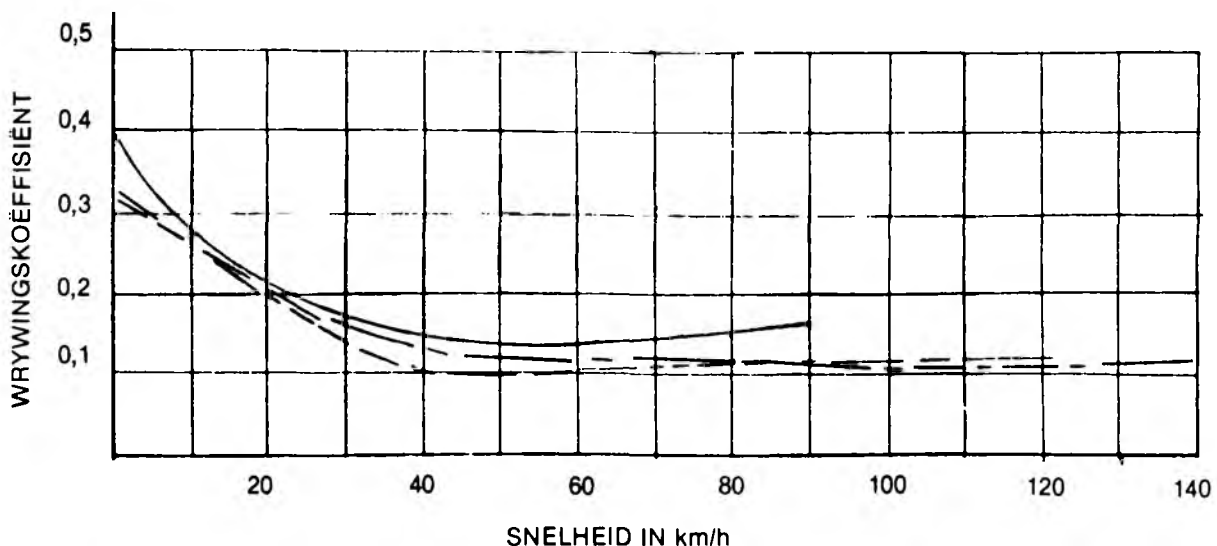
remblokdruk. By 'n spesifieke druk van 6 kg/cm^2 (588 kPa) toon die grafiek 'n konstante oombliklike wrywingskoëffisiënt van 0,11. Waar die spesifieke druk verhoog is na 12 kg/cm^2 (1175 kPa) dui die μ -kromme op 'n gelykmatige vlak van 0,05 tussen 100 en 120 km/h . Dit beteken dat die totale remkrag effektief afgeneem het by die aanwending van dubbel die hoeveelheid druk op die tussenvlak.

1.20 EKSOTERMIESE REAKSIE VAN 'N GIETYSSTERREMBLOK OP 'N STAALREMPAD

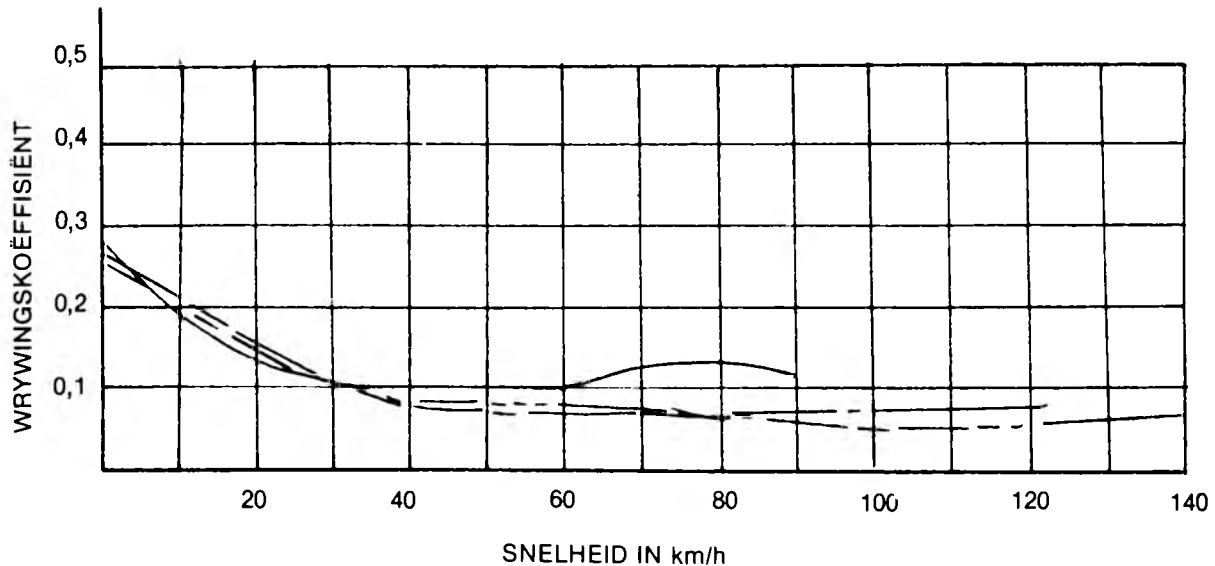
1.21 Wanneer 'n spoorweg-tipe wiel vanaf ongewone hoë snelheid gerem word en 'n bo-normale rem-energieverniegigingstempo vereis word, is die tempo van oppervlakoksidasie en ontvoling van 'n gietysterremvlak vinnig genoeg om die verbranding van yster te ontketen binne 'n verhitte



FIGUUR 1a: Gekombineerde verspreiding van μ vs V met waardes van $p = 3 \text{ kg/cm}^2$ tot $p = 12 \text{ kg/cm}^2$.



FIGUUR 1b: μ vs V met $p = 6 \text{ kg/cm}^2$ (588 kPa).



FIGUUR 1c: μ vs V met $p = 12 \text{ kg/cm}^2$ (1 175 kPa).

atmosferiese suurstofgevlude tussenvlak. Ingevolge die Stephan Boltzmanwet volg 'n trap-inset van ongeveer 10:1 in die hitte-uitstralings-tempo tussen die aanvanklike oksidasie-ontkooling-stadium en die onvermydelike ysterverbrandingstadium nadat silikon, mangaan en ander onsuierhede uitgebrand is en die koolstofinhoud 'n vlak van ongeveer 0,07% bereik het.

1.22 Atmosferiese suurstof wat deurgesuig word oor 'n semi-vloeibare warm ysterremvlak ondersteun dus 'n eksotermiese proses waartydens yster omgesit word in gesmelte staal ooreenkomstig die proses binne 'n Tropenas-omsetter in 'n staalgietery. Die bykomstige eksotermiese hitte bo die wrywingsinset van die μ -PV-komponent is reeds ondervind deur Weaver et al³ in die VSA, S. Wise⁴ en G.R. Lewis in die Verenigde Koninkryk en ook deur skrywer.⁵ Die uiteenlopende waarnemings en toetsprosedure wat onderskeidelik gebruik is, doen geen afbreuk aan die wesenskap van die bestaan van 'n chemiese verbrandingsproses wat deur wrywing geaktiveer word nie.

1.30 WISSELVALLIGHEID TEN OPSIGTE VAN WIEL-TOT-SPOORADHESIE ONDER TREKKRAGTOESTANDE BY GIETYS-TER-GEREMDE WIELE

1.31 Die geringste vorm van eksotermiese verbranding suiwer die loopvlak van koolstofbesmetting in die geval van gietyster-geremde wiele. Besmetting deur 3% koolstofinhoud in gietysterremblokke skep nie 'n probleem tydens die remming van relatief sneldraaiende wiele nie. Wiel-tot-spoor-adhesie is egter kritiek by rangeertoepassings waar die krag van die lokomotief, weens swak wiel-tot-spooradhesie, nie na die trekstang oorgedra kan word nie.

1.32 As voorbeeld kan genoem word dat 'n dieselelektriese lokomotief, klas 31, van die Suid-

Afrikaanse Vervoerdienste, toegerus met remblokke van die 840/N-samestelling, in staat is om normaalweg twee en twintig hooflynpassasiersrytuie vanaf die diensputte in die Braamfonteinwerf teen 'n gekompenseerde opwaartse helling na die rangeerwerf te sleep. Dieselfde lokomotief kon slegs 14 rytuie langs dieselfde roete sleep terwyl dit met gietysterremblokke toegerus was, uitsluitlik omdat wielglip die vraag in so 'n mate beperk het.

1.40 VORDERING WAT GEMAAK IS MET DIE VERVANGING VAN GIETYS-TER AS LOOPVLAKWRYWINGSMATERIAAL

1.41 Nuwe ontwikkelings op die terrein van loopvlakremming het aanleiding gegee tot die ontstaan van 'n tegnologie wat strek oor baie dissiplines. Binne die studierigting bekend as tribologie (vroeër tribofisika) word, onder andere, wrywings- en slytasiemeganismes intensief ontleed. Daar is vasgestel dat wrywing tussen metale met gelyksoortige atoomroosters bestaan uit die verbreking van adhesie-verbindings en, in die geval van polimeer-samestellings, uit die verbreking of vernietiging van kohesie-verbindings. Laasgenoemde stelling geld ten opsigte van polimeer-wrywingspare sowel as polimeer-metaalwrywingspare. In die geval van ongesmeerde metaalvlakke wat digby mekaar gebring word, bepaal die interatoomkragte wat verantwoordelik is vir die kohesie-sterkte van die metaal, ook die adhesiekrag en dus die statiese wrywingskrag. In geïsoleerde posisies wat metallurgies skoon en digby mekaar beweeg, kan plaaslike metaalverbindings gevolglik ontstaan met hoë adhesiekragte van dieselfde orde as die kohesiekragte binne die metaal self.

1.42 Triboloë het verder vasgestel dat oksidasie die oppervlakte-energie van metaalvlakke verlaag. Dun oksiedbedekkings is bros, en die moontlik-

heid van adhesiesentrums tussen oksied-bedeekte metale met wrywingskontak word prakties op nul gestel. Die wrywingskoëffisiënt, in die geval van 'n gietyster-tipe spoorwegremblok, word hierdeur verlaag eweredig met die mate van oksidasie teenwoordig.

- 1.43 Daar is ook bepaal dat rofheidshoogtes van vlakke wat blootgestel is aan 'n wrywingsinteraksie, wel deur die oksiedbedekkings kan dring om op geïsoleerde punte adhesieverbindings te vorm. Naumov⁶ het vasgestel dat indien 'n tussenvlak van fenolformaldehid-staal tydens skuifkontak oor 'n $\text{pH} < 7$ beskik, afskuiwing van staal-rofheidshoogtes op 'n staal-wrywingspad geweldig toeneem. Dit is waarskynlik dat suur die oksiedbedekking verwyder, sodat adhesieverbindings toeneem.
- 1.44 Kragelskii⁷ het bevind dat afgeskuipte metaaldeeltjies, deur herhaalde verfrommeling en vervorming, 'n toenemende aantal glipvlakke binne die kristalle laat ontstaan, sodat die metaaldeeltjies werkverhard en inbed in die sagter remvlak van die polimeer, vanwaar hulle as skerp beeteltjies groewe in 'n staalrempad sny.
- 1.45 Bowden en Tabor⁸ beskryf die neerslag van sulfidiese films op staal as taai, relatief hard en termies stabiel tot by 700°C . Hierdie deklaag is van belang ten opsigte van die praktiese wiel-tot-spooradhesieprobleem. Bowden en Tabor bevestig dat alhoewel $\mu > 0,5$ is vir 'n sulfidiese deklaag op staal, adhesieverbindings tussen sulfied-bedeekte staalkontakpunte selfs nie by baie hoë temperature vorm nie.
- 1.46 Die rofheidshoogte van die rempad het ook 'n invloed op steek-glip-tipe tussenvlakvibrasie. Polimeer-adhesie op staal is byvoorbeeld veral hoog in die geval van polimeer-samestellings waar die noodsaaklike reologiese eienskappe in die tussenvlak ontbreek tydens remming. Die rede is dat die oriëntering van molekulêre kettings tydens remvlakverhitting nie by bogenoemde harde elastiese samestellings moontlik is nie; aan hierdie aspek word later aandag gegee.
- 1.47 Uit die eenvoudige beginsels van meganika is dit bekend dat viskose demping vibrasie onderdruk omdat dit enige vorm van beweging teenstaan op 'n snelheid-eweredige grondslag. Differentiaalvergelykings is deur verskillende persone⁹ saamgestel om die gedempte tussenvlakvibrasiepatroon weer te gee, en dit is algemeen aanvaar deur Bowden, Tabor, Briscoe, Kragelskii en ander, dat die proses van gedempte tussenvlak-wrywing beste verteenwoordig word deur die visko-elastiese model.
- 1.50 Om hierdie model te verstaan is dit belangrik om te onderskei tussen 'n „oombliklike” en 'n „reologiese” gedragpatroon wat deur die wrywingsinteraksie gevolg kan word.
- 1.51 'n „Oombliklike” toestand beteken dat die spanning-vervormingsverwantskap binne die

tussenvlak nie met tyd verander nie. Die gedrag word dus ten volle deur 'n spanning-vervormingskromme beskryf.

- 1.52 'n „Reologiese” toestand beteken dat die spanning-vervormingsverwantskap tydafhanklik is; die gedrag is dus 'n funksie van spanning, vervorming en tyd. Kruip- of vloei-effekte is dus hier van toepassing.
- 1.53 'n *Viskose* gedrag is 'n spesiale geval van reologiese gedrag. Dit beteken dat 'n unieke verwantskap bestaan tussen spanning en vervormingstempo. Die invloed van tyd kom voor in die „tempo van vervorming”.
- 'n Verdere onderskeid behels die bestendigheid van 'n vervorming veroorsaak deur 'n spanning. Slegs suiwer elastiese materiale kan vervorming onder spanning bestendig hanteer.
- 1.54 *Elastisiteit* beteken dat vervorming sodanig uniek verwant is aan spanning dat:
1. 'n verhoging of verlaging in spanning 'n oombliklike verhoging of verlaging in vervorming of omgekeerd teweegbring.
 2. alle vervorming verdwyn indien die spanning verwyder word. Die spanning-vervormingsverwantskap hoef nie lineêr te wees nie.

2.00 ONGEWENSTE VERHITTING VAN DIE LOOPVLAK VAN 'N SPOORBAANWIEL

- 2.10 Voordat verdere aandag geskenk kan word aan die visko-elastiese gedragpatroon, is dit wenslik om eers te let op die samestelling en werkverrigtingspatroon van 'n komposisie-remblok wat nie in staat is om tydens remming sy eie dempende, semi-vloeibare tussenvlak te skep nie. In hierdie geval bestaan die grondstowwe wat in massa-verhouding saamgevoeg en gemeng word hoofsaaklik uit X% fenoliese hars, Y% krisotiel asbes, Z% bariet (BaSO_4) en moontlik 'n bietjie grafiet indien die wrywingskoëffisiënt verlaag moet word.

Die fenoliese hars, 'n fenolformaldehid, bevat 'n verharder, naamlik heksametileentetramien. Die verpoeierde mengsel word saamgepers en elektries verhit tot by ongeveer 110°C . 'n Eksotermiese reaksie tree in werking en die mengsel se temperatuur styg tot 130°C . In die termoplastiese stadium word die mengsel saamgepers deur die aanwending van periodieke drukpulsse wat onderbreek word met tussenpose van 2 tot 4 minute oor 'n periode van ± 25 minute met die doel om gas uit die persvorms te laat ontsnap. Na voorlopige afwerking word die remblok weer 12 uur in 'n gasafdrywingsoond tot 140°C verhit.

2.20 WAARNEMINGS ONDER TOETSTOESTANDE

Indien die eindproduk wat so verkry is op 'n dinamometerwiel getoets word, is die volgende verskynsel waarneembaar:

- 2.21 Swart kolle ontstaan op die loopvlak van die

wiel tydens 'n remaanwending weens die voorkoms van steekglipvibrasie.

- 2.22 Tydens vermindering van rotasiesnelheid, soos in die geval van 'n stop-toets, bly die steek tussen die kolle onveranderd en domineer die vaste vibrasie-amplitude die geforseerde vibrasiefrekwensie streng volgens rotasiesnelheid van die wiel vanaf aanvanklike snelheid tot en met stilstand van die wiel.
- 2.23 By verhitting van die remvlak bo 160°C ontbind die termies minder stabiele verbindings, en indien suurstof in die tussenvlak teenwoordig is, vervang eksotermiese verbranding van die organiese komponente enige moontlike verkolingsreaksie wat sou kon plaasvind in 'n gesmoorde tussenvlak-atmosfeer. Die tussenvlak word dus eksotermies verhit bo die bereik van die μ PV-komponent. Die totale hitteneerslag op die wiel vind plaas binne die beperkte oppervlakte van die kolle. Termiese uitsetting binne 'n rooi-verhitte kol, omring deur 'n relatief koue loopvlak, veroorsaak permanente vervorming onder drukspanning met sferiese deurbuiging na buite. Wanneer die wiel afkoel, krimp die oppervlakte binne die oorverhitte kol. Weens die plastiese vloeï wat tydens verhitting onder drukspanning plaasvind binne die kol, is daar, ná afkoeling, 'n trekspanning teenwoordig. As gevolg van die plastiese vloeïgeskiedenis in die drukspanningsrigting is die elastiese grens van die staal, ná afkoeling, binne die kolle verlaag in die trekspanningsrigting. Die loopvlakmateriaal is dus permanent verswak binne die kolle en kraak as gevolg van termiese vermoedheid.

3.00 HITTE-INDRINGING VANAF DIE TUSSENVLAK NA DIE REMMATERIAAL

Alhoewel die begrip „ablative plastic” (vlamdigtingsplastiek), afgelei van „ablation”, oorspronklik gebruik is om die erosie en disintegrasie van meteoriete te beskryf tydens die intense verhitting op hulle baan deur die atmosfeer, is die betekenis van die woord later ook uitgebrei tot die lugdinamiese verhitting van missielneusdoppe, waarvan vele reeds tydens die era van die V-2 in die Tweede Wêreldoorlog en daarna op hulle terugroete deur die atmosfeer uitmeekaargespat het.

Die element koolstof (kristalstruktuur: 7440-44-0) beskik, weens sy hoë hittekapasiteit, hoë verdampingsenergie, hoë smeltingstemperatuur en smeltingsdruk benodig, oor die hoogste vlamdigtingshitte (hitte-energie-absorpsie per eenheid massaverlies) van alle materiale, op voorwaarde dat meganiese verwerking deur middel van 'n interne, fisiese bewapeningstruktuur beperk word.

'n Grafitiese koolstof wat vry is van gasge vulde en selfs oop porieë, soos byvoorbeeld pirolitiese grafiet, beskik oor die hoogste sublimasietemperatuur nl. $4130 \pm 30^\circ\text{K}$ by $12 \pm 1\text{MPa}$.

Naas pirolitiese grafiet bied C = C-samestellings die beste temperatuurvastheid tydens vlamdigting, indien hulle oorspronklik by lae temperatuur vervaardig is.

- 3.10 Die geleidingstempo van 'n hittepuls deur 'n materiaal word bepaal deur die termiese diffusiwiteit wat bestaan uit die verhouding:

$$\frac{\text{hittegeleidingskoëffisiënt}}{\text{volumetriese hittekapasiteit}}$$

Organiese plastieksamestellings beskik nie alleen oor die laagste hittegeleidingskoëffisiënt nie, maar ook oor die hoogste soortlike warmte van alle strukturele materiale. 'n Plastieksamestelling beskik dus oor 'n uitstaande vermoë om hitte-indringing te vertraag, en indien die soortlike warmte as temperatuurfunksie bepaal word ten opsigte van verskillende materiale tot by 5 000°C, word gevind dat van alle vaste stowwe, organiese plastieke, in die afwesigheid van suurstof, oor die beste vuurvaste eienskappe beskik.

By hoë temperature gee hierdie plastieke ook groot volumes gas af wat hitte-indringing deur konveksie blokkeer.

Gas-evolusie by harsamestellings, wat hoofsaaklik bestaan uit waterstof, is uiters belangrik omdat dit die effektiewe tussenvlak verdik met 'n blokkerende transpirasieverkoeling na buite, wat onder praktiese toestande tot 50% van die netto hittevlod stuit. Kirk Othmer¹⁰ beweer dat die vlamdigtingshitte van menige harsamestellings vir neusdop-beskerming, ongeveer veertig maal meer doeltreffend is as dit waartoe 'n koper-hitteput in staat is.

- 3.20 Die harskomponent van 'n tipiese bewapende plastiekvlamverdiger beslaan ongeveer 35% van die totale massa van die samestelling; dié van 'n komposisie-remblok tot 27%. Wanneer 'n veselbewapende, gevulde hars-elastomeer-kopolimeerremvlak op die loopvlak van 'n spoorbaanwiel deur middel van wrywing aan 'n piroliseringsreaksie blootgestel word, reageer dit eerstens as hitteput. Terwyl die wrywingshitte toeneem, smelt die kopolimeer onmiddellik benede die kontakvlak. Kort daarna degradeer die viskose gesmelte kopolimeer, terwyl dit meng met benatbare anorganiese vulstofdeeltjies en grafiet wat deur die rembloksamestelling vrygestel word, tot 'n skuimende, koolstofagtige massa en uiteindelik tot 'n poreuse koolbedekking. Hierdie werkende bedekking word hoofsaaklik deur oppervlaktespanning tot eenheid aan die dieperliggende rembloksamestelling verkleef.

- 3.30 Aangesien die piroliseringsreaksie die noodsaaklike gasse voorsien vir transpirasieverkoeling van die verkoolde materiaal is die ontbindingsprodukte van uiterste belang. Tot by 350°C is water die belangrikste produk. Hierna volg depolimerisasie met die vrystelling van fenol en swaarder spesies. Bo 530°C volg

- transpirasieverkoeling deurdat produkte met lae molekulêre massa vrygestel word. Veral bo 700°C word hooggeleidende waterstof as die primêre bestanddeel (in die afwesigheid van suurstof) in groot hoeveelhede vrygestel. 'n Fenol-silika-verkolende vlamdigtingsplastiek is hoogs doeltreffend. Die vlamdigtingsreaksie bo 600°C bestaan uit die aftakeling van die krisotielasbes-molekule, gevolg deur 'n oorheersende C-SiO₂-reaksie. Die hitte-indringingsdiepte van hierdie poreuse nie-geleidende laag word deur die teenwoordigheid van Fe₂O₃ in die samestelling beperk en verder verbeter deur die teenwoordigheid van bariet (BaSO₄), een van die beste reflektiewe vlamverdigers wat vir hierdie doel ook op die Amerikaanse Venusruimtetuig aangewend is. Deur die byvoeging van 'n elastomeercomponent verdik die poreuse laag en skep dit stabielere dinamiese wrywings-toestande met verbeterde afdigting teen suurstofindringing; die antwoord op geforseerde vibrasie-insette afkomstig van geringe rondheidsafwykings op die loopvlak van 'n sneldraaiende wiel. In 'n geval waar samestelling 655/C¹¹ vir ondersoek van sy houder verwyder is, onmiddellik nadat dit 'n toetslokomotief met 'n ongeremde toetsrytuig teen 'n afwaartse helling vanaf 245 km/h tot stilstand gebring het, was die remvlakdeklaag 3 mm dik en kon dit met die duimnael ingedruk word. 'n Spesifieke remkrag van 1,92 kW/cm² by aanvang van die remaanwending was hier van toepassing.
- 3.31 Kirk Othmer¹² meld ook as voorbeeld ten opsigte van die skepping van vlamdigtingsplastiek, dat 'n hittevloed van 0,5 kW/cm² vir 100 sekonde 'n tipiese hitte-aanslag verteenwoordig op die neusdop van 'n missiel wat die aarde se atmosfeer binnedring. Barnard¹³ dui reeds in 1975 aan dat die normale aanvangsenergie-vernietigingstempo van remaanwendings met komposisie-remblokke onder verskillende praktiese toestande in Suid-Afrika en Europa geleë is binne 'n μ PV-bereik van 0,265 kW/cm² by 80 km/h en 0,563 kW/cm² by 100 km/h, waartydens ook die stoptyd dikwels van dieselfde orde is as dié van 'n neusdop op sy terugroete deur die aarde se atmosfeer.
- 3.32 Eksotermiese effekte, indien dit sou voorkom, sal vanselfsprekend 'n hittetoevoeging lewer bykomstig tot die bogenoemde energiewaardes. In die geval van beide die remvlak sowel as die neusdopdeklaag is daar hoofsaaklik 'n beperkte kontak met suurstof sodat die eksotermiese CO- en CO₂-reaksies daardeur beperk word. In beide gevalle word 'n veselbewapende fenoliese samestelling verhit deur 'n wrywingswisselwerking. Slegs 'n drukverskil is geleë in die tipe kouer vlak wat aanleiding gee tot die verkoling van die warmer polimeersamestellingsvlak. In die geval van die neusdop is die μ PV-komponent V-georieentend en in die geval van die remblok is dit P-georieentend.
- 3.33 Verdere ooreenkomste met die missielneusdopbedekking uit Kirk Othmer¹⁴ is die elastomeerskild bykomstig tot die gebruik van die anorganiese vulstowwe Fe₂O₃, BaSO₄ en ontgasde kristallyngraafiet. In albei toepassings kom daar ook 'n skuimende, verkolende C-SiO₂-deklaag voor, afkomstig van die ontbinding en degradering van die viskose, gesmelte polimeer en ontbinde SiO₂-draende vesel. Hierdie deklaag is in albei gevalle tot 3 mm dik, sag, met die blote oog sigbaar en in ooreenstemming met die beskrywing van die remvlak van 'n 655/c-remblok pas ná 'n remaanslagintensiteit van 1,92 kW/cm².
- 3.34 'n Praktiese kenmerk van die ongepiroliseerde 655/C-samestelling is dat dit maklik op 'n oop vuur aan die brand slaan en uitbrand weens die vinnige oksidasie van die butadien-inhoud op so 'n oop vuur. Deur die aanwending van wrywingskragte op die remvlak van samestelling 655/C is dit egter totaal onmoontlik om die remvlak te laat ontbrand na pirolisering, ongeag die energievernietigingstempo.
- 3.40 Om die wrywingskoeffisiënt te beheer te midde van snelheid- en temperatuurskommelings is dit belangrik om skuifspanning-afskuiftempo (τ vs $\dot{\gamma}$) effekte te ondersoek. Hierdie inligting is beskikbaar in handleidings wat handel oor Reologie en Reogoneometrie. Dit is noodsaaklik dat die tussenvlakdeklaag bestaan uit 'n swaarbelaaide verspreiding van mikroskopiese klein anorganiese deeltjies binne 'n gesmelte polimeer. 'n Hoë oppervlakspanning op die deeltjies is uiters belangrik en die mate van oppervlakbenutting van hierdie deeltjies bepaal die reologiese eienskappe van die tussenvlak. Deur gebruik te maak van mika, mika-agtige ysteroksied en van ontgasde natuurlike kristallyngraafietplaatjies word 'n semi-vloeibare suspensie geskep wat weens hoë oppervlakspanning onafskeidbaar kleef aan die basis-struktuur van die polimeersamestelling tydens hoë energie-insette van die orde van 1,9 kW/cm².
- 4.00 DIE ADHESIE-MEGANISME VAN POLIMEERWRYWING EN REOLOGIESE WETTE ONDER DINAMIESE TOESTANDE**
- Uit die bostaande is dit duidelik dat 'n gebalanseerde rembloksamestelling tydens wrywingswisselwerking
- sy eie grenslaagsmeermiddel skep,
 - die tussenvlak daarmee afseël teen suurstofindringing,
 - steekglipvibrasies daarmee verhoed en,
 - in die geval van die lae wrywingsremblok, selfs sy eie kontakoppervlakte definieer vir 'n gegewe stel kontakvoorwaardes.
- 4.10 Die Bowden-Tabor-vergelyking vir 'n mengsel van Coulomb- en visko-elastiese wrywing sien soos volg daaruit.
- $$F = \alpha A s + (1 - \alpha) A \tau \quad \text{of} \quad A[\alpha s + (1 - \alpha)\tau]$$

- waar F = die totale wrywingskrag
- A = die nominale kontakoppervlakte
- α = die gedeelte van A onderhewig aan die verbreking van adhesieverbindings deur rempadstaalafskuiwings
- s = die spesifieke afskuiwsterkte van die rempadstaal
- τ = die spesifieke skuifweerstand van kohesieverbindings binne die polimeertussenvlak

4.20 Indien geen metaal afgeskuiw word nie en die remming dus uit 'n suiwer visko-elastiese wisselwerking bestaan, is $\alpha = 0$ en F reduceer tot

$$F = \tau A$$

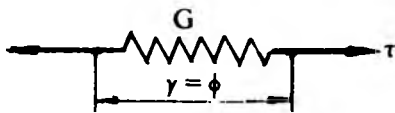
Hierdie vereenvoudigde vorm van die Bowden-Tabor-vergelyking geld slegs waar geen adhesieverbindings met die staalrempad voorkom en geen staalrofheidshoofdes dus afgeskuiw word nie. Dit is selfs moontlik om metaalvulstof in die samestelling te plaas mits hierdie metale nie met koolstof reageer nie, byvoorbeeld lood, koper, tin, sink en hulle onderlinge legerings.

In die geval van kool-waterstofverbindings waar intermolekulêre kragte uitsluitlik uit Van der Waal-kragte bestaan, word die oppervlakkrag $F = \tau A$ gekenmerk deur die Van der Waaleienskappe van die atoomstrukture teenwoordig.

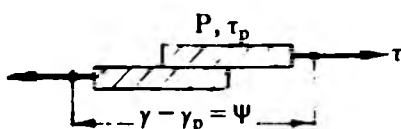
5.00 DIE BETEKENIS VAN 'N VISKO-ELASTIESE GEDRAGSPATROON

Daar bestaan drie modelle wat die lineêre of reglynige gedragspatroon ten opsigte van weerstand beskryf. Hieruit vloei nog veertien samevoegings voort wat elk 'n fisiese weerstandsmeganisme verteenwoordig.

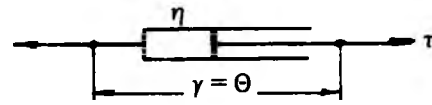
5.10 Die perfekte elastiese veer: Dit simboliseer suiwer lineêre elastiese gedrag naamlik omkeerbare oombliklike eweredigheid tussen spanning en vervorming.



5.20 Perfekte plastisiteit voorgestel deur die wrywingsblok. (Werkverhardingsglipvlakke): Dit simboliseer 'n suiwer plastiese vervorming met onomkeerbare eweredigheid tussen spanning en vervorming bo 'n sekere kritieke spanning. Die spanning-vervormingsverwantskap is slegs uniek solank as wat die spanning in hoeveelheid toeneem in dieselfde rigting – positief of negatief.

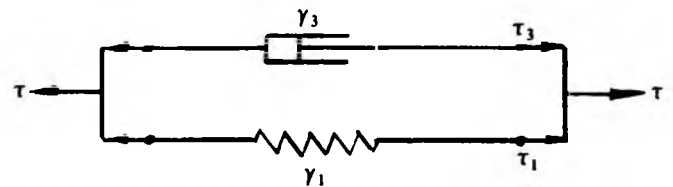


5.30 Die viskose demper: Dit simboliseer 'n suiwer lineêre viskose gedragspatroon, naamlik omkeerbare eweredigheid tussen spanning en vervormingstempo. $\tau = \eta \frac{d\theta}{dt}$

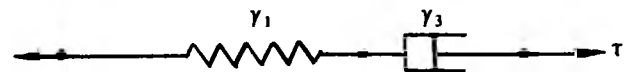


5.40 Die visko-elastiese model bestaan uit 'n samevoeging van 5.10 en 5.30 in 'n parallelrangskikking.

5.41 'n Parallelrangskikking beteken dat die vervorming gelyk is in beide elemente, dit wil sê: $\gamma = \gamma_1 = \gamma_3$ en die totale spanning $\tau = \tau_1 + \tau_3$



5.42 In die geval van 'n serie-rangskikking beteken dit dat die spanning $\tau_1 = \tau_3$ ten opsigte van beide elemente, en dat die totale vervorming die som is van die vervorming in beide elemente $\gamma = \gamma_1 + \gamma_3$



5.50 Die ontwikkeling van geskikte tussenvlak-eienskappe vereis 'n kundigheid ten opsigte van die volgende faktore:

- 5.51 Die snelheid en rofheidshoogte van die rempad.
- 5.52 Die hardheid, ná samestelling, van die bindmiddels in die basiese struktuur van die remblok, uitgedruk in terme van die Shore D-skaal. Hierdie lesing is 'n funksie van die verhouding van termoset-hars tot elastomeer-inhoud.
- 5.53 Die tipe en massa-inhoud vulstof wat hoofsaaklik uit anorganiese materiaal bestaan en waarvan die hardheid op die Moh-skaal verkieslik nie 7 oorskry nie. Met die tipe vulstof word bedoel of dit veselagtig, amorf of verpoeierte kristalle is en waaruit die kristalstruktuur bestaan.
- 5.54 In die meeste gevalle is die grofheid van poeiers, asook die suiwerheid en neutraliteit daarvan, belangrik.
- 5.55 Veroudering speel 'n belangrike rol by sommige bindmiddels, versnellers en aktiveerders, sodat voorraadbeheerprosedure en bergingstemperatuurgrense streng nagekom moet word.
- 5.56 Afwerking mag in die finale stadium nie uitgevoer word met slypvlakke wat korund bevat nie. Staalborselbewerking moet alle slypprosesse van bogenoemde aard opvolg.

- 5.57 'n Toetsbankwaarnemer moet oor die basiese kundigheid ten opsigte van polimeerfilms en hulle reologiese eienskappe by verskillende temperature beskik.
- 5.58 Dit is verkieslik dat die toetsbankwaarnemer en die samestellingdeskundige dieselfde persoon is en dat hy ook oor 'n grondige kennis beskik ten opsigte van hars- en rubbertegnologie.
- 5.60 Die belangrikste meganismes binne die tussenvlak is dié van vibrasiedemping, afdigting teen suurstofindringing en vlamverdigting teen hitte-indringing.

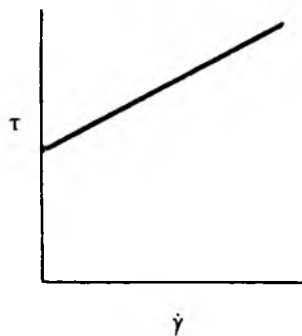
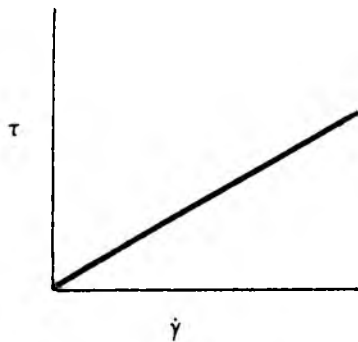
Vibrasie-demping beïnvloed die remkrag omdat $F = \tau A$ en $\tau = \eta \dot{\gamma}^n$

waar, η die dinamiese viskositeit

$\dot{\gamma}$ skuif-vervormingstempo

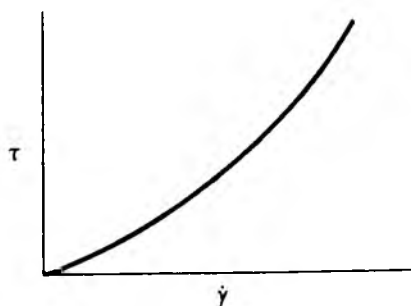
en τ skuifspanning, voorstel

- 5.61 Indien $n = 1$ is die reologiese gedragpatroon dié van 'n Newtoniese vloeistof

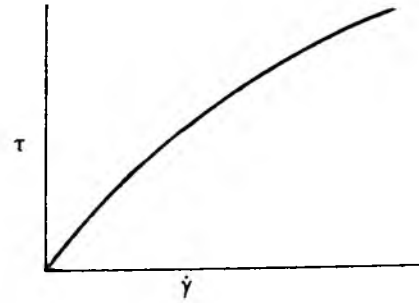


„Bingham Body”
(Par. 6.50)

- 5.62 Indien $n > 1$ word die gedrag beskryf as „dilatente vloeï”.



- 5.63 Indien $n < 1$ is word die gedrag as „pseudoplastiese vloeïweerstand” beskryf.



- 5.70 Hoe digter die benatte deeltjies gepak is binne die vloeibare fase, hoe groter is die neiging tot dilatensie omdat 'n verdigting van werwelstrome met toename in $\dot{\gamma}$, holtes en strukture vorm wat die viskositeit verhoog.

Hoe groter die toevoeging van gesmelte polimeer, hoe laer die verdigting van die anorganiese dispersie en hoe groter die neiging tot pseudoplastiese vloeïweerstand.

6.00 DIE SEMI-VLOEIBARE TUSSENVLAK AS BESKERMING TEEN EKSOTERMIESE REAKSIE BY 'N KOMPOSISIE-REMBLOK

- 6.10 Kragelskii¹⁵ sê dat die teenwoordigheid van 'n semi-vloeibare deklaag op die remvlak 'n kenmerk is van 'n verbeterde klas remmateriaal. Dit verhoed die swak eienskappe van die remblok wat beskryf is in paragraaf 2.21. Dit is afkomstig van die selfvoedende eienskap van 'n polimeerbestanddeel wat smelt tydens wrywingsverhitting om daarna voortdurend na die remvlak te diffundeer eweredig met die verhitingsintensiteit. Die semi-vloeibare deklaag op die remvlak kan dus verkry word deur die kruiskoppeling van 'n fenoliese hars met 'n elastomeer ko-polimeer. Die verhouding van fenoliese hars (met heksametileentetramien) tot die elastomeer-inhoud bepaal die verkolingsdigtheid, die mate van tussenvlak-afseëling teen suurstofindringing en, tesame met die deeltjies in suspensie, die reologiese karakter van die τ vs $\dot{\gamma}$ kromme met temperatuur. Die gedrag van die remvlak onder statiese wrywingstoestande word hoofsaaklik bepaal deur die orde van benatting van die klein deeltjies en die mate van polimeer-oriëntering met inagneming van die tyd-effekte wat van toepassing is.

- 6.20 Soos reeds vermeld, is die wrywingskrag by 'n komposisie-remblok nie afkomstig van die adhesiekragte tussen die remmateriaal en die wiel nie. Hierdie adhesiekragte is veel hoër as die kohesiekragte binne die remmateriaal self. Gevolglik word remmateriaal oorgedra op die loopvlak waar dit deur adhesiekragte aan die wiel verbind word. Daar word dus gerem deur die verbreking van kohesieverbindings tussen die rempaddeklaag en die remblok. Tussenvlak-temperatuurstyging gee aanleiding tot bewegingsoriëntering van molekules in die deklaag. Laasgenoemde speel 'n belangrike rol in beide

- die oordragingsproses sowel as die intermolekulêre wrywingspatroon wat daarna volg.
- 6.30 Die aanvanklike oordraging van polimeer na die rempad onmiddellik na kontak is klonterig, en die tussenvlak bestaan uit heterogene organiese verbindings wat relatief hoë wrywingsweerstand bied. In die praktyk is die kontakoppervlakte aanvanklik klein. Dit groei egter met defleksie onder toenemende druk en ook deur die meesleuring en verspreiding van polimeerkettings binne die tussenvlak. Namate temperatuur met tydsvlerloop toeneem, word die tussenvlak toenemend gevoed deur polimeer wat uitsweet op die remvlak, en word die heterogene toestand binne die semi-vloeibare deklaag verminder deur verdere afbreking van die basisstruktuur en deur die oriëntering van polimeerkettings in die rigting van relatiewe beweging. Deur die verryking van die tussenvlak met gesmelte polimeer volg toenemende benatting en die verlaging van oppervlakspanning op vulstofdeeltjies binne die deklaag. Die oorspronklike klonterige, organiese deklaag wat op die rempad oorgedra is, verander tot 'n dun, tenger film wat wissel van 2 tot 10 nm dikte. Hierteenoor bied 'n afname in die benatting van klein deeltjies in 'n dispersiesistiem 'n verhoging in die kapillêre kragte en oppervlakspannings, wat die tussenvlakskuifkrag verhoog.
- 6.40 Sodra die remblokdruk afgelos word, ontsnap daar 'n duidelik sigbare hoeveelheid gas wat tydens remming opgepot is benede die semi-vloeibare deklaag. Hierdie gas dring deur die remvlak en veroorsaak algehele distorsie van alle vorige molekulêre oriëntasie. Oorvloedige polimeervloeistof word deels na binne gesuig weens uitsetting van die onderliggende remmateriaal tydens 'n afname in drukkrag en deels verdamp deur 'n afname in druk van die ont-snappende gas self. Die heterogene struktuur is herwin en dus ook die hoë wrywingskoëffisiënt voor oriëntering van polimeerkettings.
- 6.50 Die droogheid en hardheid van die remvlak ná aflossing van remblokdruk en terugsuiging en verdamping van 'n gedeelte van die benattingskomponent bepaal die voorkoms en orde-grootte van die reologiese verskynsel wat bekendstaan as 'n „Bingham Body” en wat aangedui word deur die intersep op die τ -as van die τ vs $\dot{\gamma}$ karakteristiek van die semi-vloeibare emulsie. 'n „Bingham Body” is niks anders as die vloeipuntverskynsel ten opsigte van die tussenvlakskuifspanning by nul tussenvlaksnelheid nie. Die hoogte van die intersep op die τ -as bepaal die orde-grootte van die statiese wrywingskomponent wat bereikbaar is vir 'n bepaalde tussenvlakdruk voordat die wiel sal begin draai. Hierdie eienskap is van uiterste belang by die statiese remming van lokomotiewe wat gekoppel is aan lang, ongeremde vragte op afwaartse hellings. Omdat dit egter 'n reologiese funksie is, neem dit vinniger of stadiger toe met verloop van tyd na die voorafgaande remaanwending, afhangende van die remvlakdroogheid of remvlaknathed respektiewelik wat die rembloksamestelling bied.
- 7.00 LOOPVLAKSPLYTASIE MET 'N „W-PATROON”**
- 7.10 Daar is drie meganismes wat aanleiding gee tot hierdie vorm van loopvlaksplytasie. Eerstens ontstaan W-patroonsplytasie veral op nuwe of nuutgedraaide loopvlakke. Die rempad op wielloopvlakke van stabiele draaistelle word hoofsaaklik in die middelste omgewing van die loopvlak werkverhard deur kontak met die spoorbaan. Die loopvlak langs die flens en aan die flenslose sy van die wiel, wat minder onderhewig is aan werkverharding deur spoorkontak, behou vir 'n langer periode 'n groter rofheidshoogte. Afgesien van die feit dat die metaal daar sagter is, ondervind hierdie gebied groter wrywingshitte-ontwikkeling. W-patroonsplytasie het dus ook sy ontstaan te danke aan oneweredige werkverharding van nuwe loopvlakke, veral in dié gevalle waar die volgende twee aanleidende oorsake, naamlik eksotermiese reaksie en $\text{pH} < 7$, reeds daar teenwoordig is.
- 7.20 Alle remblokke met 'n swael-gekoppelde elastomeer toevoeging is, ten opsigte van rempadsplytasie, gevoelig vir eksotermiese verbranding en vir 'n $\text{pH} < 7$. Die invloed van die eksotermiese verbranding op die rembloksamestelling veroorsaak 'n swaelommekeringsreaksie wat eerstens neerkom op die ontbinding van polisulfidiese koppelings gevolg deur ontbinding van mono- en disulfidiese verbindings by hoër temperature om sodoende swaelmolekules vry te stel. Swaelmolekules diffundeer na buite tydens verhitting, en weens vogopname uit die atmosfeer word swaeluur op die syvlakke van die remblok gevorm wat die pH-waarde tot benede die neutrale punt laat daal. Ysteroksiedbedekkings onder die sye van die remblok word aangeval en splytasie deur die afskuiwing van adhesie-verbindinge neem toe.
- 7.30 Die derde meganisme is afkomstig van onvoldoende polimeerbenatting van tussenvlakdeeltjies direk onder die langsigtingsy van die remblok waar die afdigting teen atmosferiese suurstofindringing faal en eksotermiese hitte hoër is as binne die sentrale gebied van die tussenvlak.
- 8.00 SLOTSOM**
- 'n Wrywingsmeganisme is verweselik met die vermoë om, soos reeds bewys is, met behulp van samestelling 655/C remenergie te vernietig met minimale rembloksplytasie en sonder enige eksotermiese nuwe-effekte op die praktiese loopvlakrofheidshoogte van 'n lokomotiefwiel, teen 'n inset van $1,92 \text{ kW/cm}^2$ na remaanslag by 'n rempadsnelheid van 245 km/h . Na remaanwending het die remenergie-intensiteit ongeveer

reglynig afgeneem met afname in snelheid tot 0,78 kW/cm² by 100 km/h oor 'n periode van 46 sekondes. 'n Konstante remblokdrukkrug van 46,2 kN per remblok is gehandhaaf deur 16 remblokke op 8 wiele van 1 220 middellyn in 'n Bo-Bo-rangskikking. Die lokomotiefmassa was 88 900 kg teen 'n samegestelde afwaartse helling van 1 in 430 oor 'n afstand van ongeveer 550 m, gevolg deur 'n afwaartse helling van 1 in 100,69 oor ongeveer 800 m en 1 in 112,4 oor die laaste 850 m. Met inagneming van 'n remblokdruktydkonstante van ongeveer 4 sekondes sowel as die invloed van hellings, rol-en windweerstand, is 'n werklike gemiddelde wrywingskoeffisiënt $\mu_m = 0,15$ gehandhaaf tussen 245 km/h en 100 km/h oor 46 sekondes. Die ooreenkomstige gemiddelde vertraging was $a_m = (-)0,0894$ g ten spyte van die ongeremde toetsrytuig en die afwaartse helling.

Uit die bostaande en uit praktiese bewese wrywingskenmerke is dit duidelik dat daar geen tegniese beperking in die vorm van onbekende, onstabiele of onberekenbare faktore bestaan wat die aanwending van samestelling 655/C, vir die doel van energie-vernietiging op enige treinremtoepassing nadelig kan beïnvloed of verhoed nie. Die wrywingseienskappe is volledig uiteengesit deur Barnard¹⁶ na aanleiding van praktiese toetse op 'n voorstedelike motorrytuig gedurende 1975, en sedertdien is geen wielskade van 'n permanente aard aangemeld of is enige versoek

gerig om die bestaande wrywingseienskappe in 'n meerdere of mindere mate te wysig nie.

VERWYSINGS

1. Kirk-Othmer. *Ency. of Chem. Tech., Vol. I*, Ablative materials, pp. 10 et seq. Altitude - Veloc. Diag.
2. Teoh H., Metz P.D., Wilhelm W.G. (1981). Elect. Cond. of Pyrolyzed Poly-acrylonitrile, Brookhaven National Laboratory, Conference, August 10-14.
3. Weaver G.R. et al. (1970). Investigation of the Thermal Capacity of Railroad wheels using COBRA brake shoes, *ASME Trans*, 92, Serie, 366-374.
4. Wise S & Lewis G.R. (1970). Composition brake blocks and tyres, *Jnl. Inst. Mech. Eng., Railway Div. I*, 4, 386-444.
5. Barnard J.H. (1975). *The development of resin composite materials for wheel tread brake applications on railway rolling stock*, B.Sc. (Ing.)-Thesis, Univ. van Pretoria, RSA, par. 9.11.
6. Naumov S.L. (1960). Investigation of the Resistance of metals to Abrasive Wear, *Issledovanie Soprotivleniya Metallov Abrazivnomu Iznashivaniyu*, State Bull. Physics, (GVF) Kiev.
7. Kragelskii I.V. (1965). *Friction and Wear*, (Butterworth, London), p. 21.
8. Bowden F.P. & Tabor D. (1967). *Friction and lubrication*, (Methuen, London), p. 134.
9. Golden J.M. (1978). *Wear. Nat. Inst. for Phys., plann. & Constr. Res. Dublin, Irel.*, 48, 1, 73-86.
10. Lenk R.S. (1968). *Plastics Rheology*, (Maclaren, London), app. I and II, 200-210.
11. Ibid verw. 1, p. 15.
12. Barnard J.H. (1979). A new interfacial friction concept for on-tread braking of railway rolling-stock, *Rail International*, Sept. 727-735.
13. Ibid verw. 1, p. 16.
14. Ibid verw. 5, p. 319.
15. Ibid verw. 1, p. 14.
16. Ibid verw. 7, p. 314.
17. Ibid verw. 5, pp. 285-319.