

Wrijving, hysteresis, fixeren en microslip (2)

Constructies voor het nauwkeurig bewegen en positioneren (12)

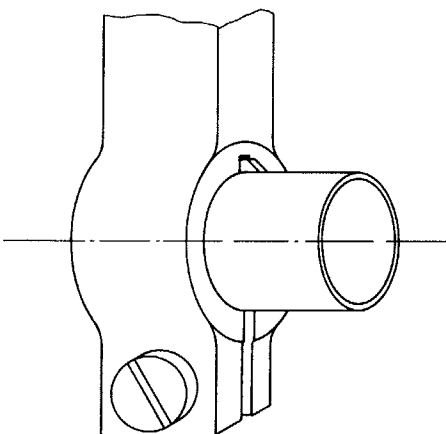
P.C.J.N. Rosielle,
E.A.G. Reker, M.P. Koster

Voorbeelden van hysteresis arme constructies (vervolg)

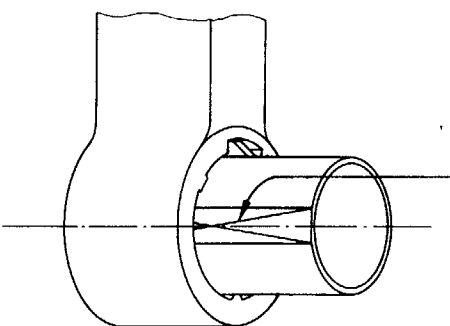
Het omklemmen van een bus

Bijzondere aandacht is nodig als men blijvende positioneringsnauwkeurigheid wil bereiken door het om elkaar klemmen van concentrische bussen, hetzij door krimpverbinding (montage met ΔT), hetzij door bijvoorbeeld klemmen van een gedeelde buitenbus zoals geschetst in figuur 131.

Gesteld dat hiermee een egale drukspanning p tussen beide bussen te bereiken zou zijn, dan zou dat leiden tot een trekspanning σ_t in de buitenbus en drukspanning σ_d in de binnenbus, waarvoor geldt $2\sigma_t t_u \approx p \cdot D \approx 2\sigma_d t_r$, waarin t de wanddikte is.



Figuur 131.



Figuur 132.

Tengevolge van de dwarscontractie wil de binnenbus axiaal uitzetten $\epsilon_1 \approx \nu \cdot \sigma_d / E$ en de buitenbus wil krimpen $\epsilon_u \approx \nu \cdot \sigma_t / E$.

Tijdens het opvoeren van de aanlegdruk treedt dus axiale slip op tussen de bussen. Pas als de wrijving $\tau = \mu p$ over een zekere lengte ℓ werkzaam is kan hij voldoende axiale trek en druk in de bussen opbouwen om dat te verhinderen.

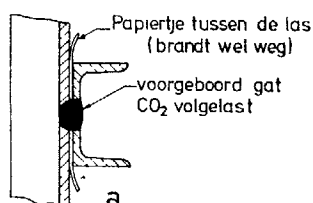
Globale schatting leert: $\ell \approx D$, met andere woorden: klembussen met $\ell < 2D$ zitten dus eigenlijk niet gedefinieerd vast!

Figuur 132 is een fraai alternatief voor het klemmen van het optisch systeem in de radiale volger van de Compact Disc speler.

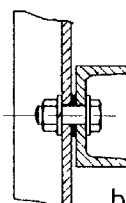
De buitenbus is een deel van een aluminium spuitgietstuk. Dat heeft een in principe bovenmaats gat met drie inwendige axiale ribben onder 120° dat op perspassingdiameter is uitgekotterd. De binnenbus (optisch systeem) is op maat gedraaid maar heeft één iets afgeplatte kant. Die maakt het mogelijk om de binnenbus vlot in het gat te schuiven tot een nok tegen de rand stuit. Door hem daarna te draaien tot de nok ook tangentiaal een aanslag ontmoet, is het geheel in de gewenste stand met de juiste klempassing gemonteerd. De passing kan zich "zetten" en de dwarscontractie kan praktisch onbelemmerd tot stand komen tijdens de tangentiale slip.

Het bestrijden van hysteresis in constructies

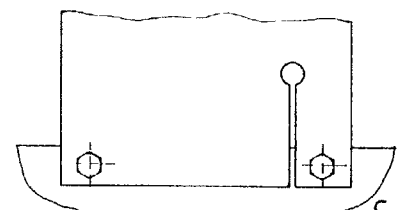
Constructies die nauwkeurig moeten zijn en blijven mogen geen hysteresis vertonen, dat wil zeggen geen geheugen voor eerdere belastingen. Vlakken



Figuur 133a.



Figuur 133b.



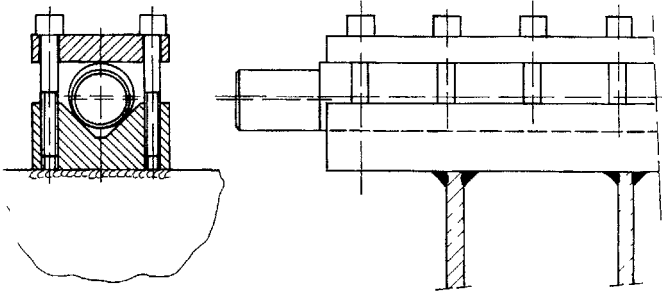
Figuur 133c.

(platen) die door bouten of lasverbindingen opelkaar getrokken zijn, zullen in het algemeen contactzones vertonen met naar nul aflopende aanlegdruk. Optredende verschuifneiging ("schuifspanning") zal het eerst in gebieden met lage vlaktedruk aanleiding geven tot lokale microslip. We moeten dus streven naar *of hoge vlaktedruk, of géén contact!*

Bij *lasverbindingen* die geen hysteresis of geheugen mogen vertonen, moet men dus vermijden dat materiaaloppervlakken buiten de las door nakrimpen op elkaar worden getrokken; zie figuur 133a.

Metingen toonden aan dat bij *puntlassen* de materiaaloppervlakken rond de las tengevolge van krimp net iets los van elkaar komen zodat bij belastingscycli geen hysteresis te meten was, behalve natuurlijk de eerste keer als de lasspanningen vrijkomen. Elke gelaste constructie is immers tengevolge van de krimp van het gesmolten metaal aanvankelijk plaatselijk op trek, druk of afschuiving tot de vloeigrens belast. Bij uitwendige belasting treedt dan direct verdere vloeï op – dus blijvende deformatie, en ook energiedissipatie. De eerste klap (aanbevolen: met rubberhamer en precies gericht op ribbe of hoekpunt) op een gelaste plaatconstructie klinkt dan ook opvallend "dof".

Bij *boutverbindingen* moet men de oplegvlakken zo dimensioneren dat de aanlegdruk in principe overal aanwezig is. Figuur 133b geeft hiervan een voorbeeld: smalle tussenleggingen (buitendiameter bijvoorbeeld 1,5 maal boutdiameter) brengen de trekkracht van de



Figuur 134a.

bout als drukkracht via een gedefinieerd oppervlak over op de plaat. De druk σ_p is egaal verdeeld en hoog: een schuifspanning $\tau < \mu \cdot \sigma_d$ kan zonder microslip worden opgenomen. Als niet alleen krachten maar ook koppels moeten worden overgebracht ontstaat er behoefte aan minstens twee van zulke verbindingsplaatsen, liefst op zo groot mogelijke onderlinge afstand. Dan dreigt overbepaaldheid die manifest wordt bij verschil in warmte uitzetting en kan zelfs in een sterk aangehaalde boutverbinding nog verschuiving optreden.

Dit is te voorkomen door een elastisch element in te voeren, bijvoorbeeld met behulp van een zaagsnede, zie figuur 133c.

Wanneer onderdelen die in eerste instantie hysteresisvrij zijn aangeklemd gezamenlijk op buiging worden belast, zullen de verlengingen ter plaatse van de contactpunten meestal in beide onderdelen niet gelijk zijn, zodat plaatse-lijke slip kan optreden.

Wil men de rekken in beide onderdelen wel gelijk houden dan moet men de neutrale lijn voor beide laten samenvallen.

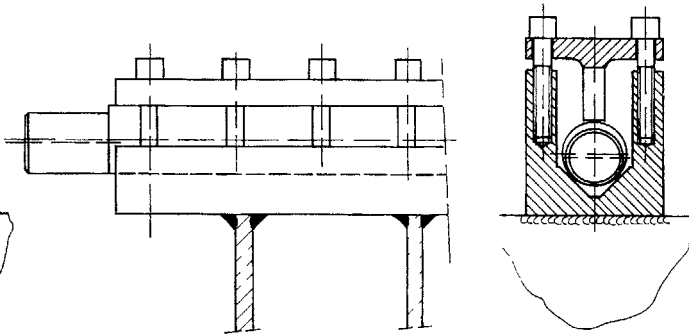
Bij een overhangende excentrische asstap werd een hysteresis van ca. 40 μm geëlimineerd door over te gaan van de constructie volgens figuur 134a naar die volgens figuur 134b.

De neutrale lijn van het V-blok is nu in de hartlijn van de as gebracht. Het aandrukstuk is door een aantal zaagsneden redelijk in staat gesteld zich bij de uitzetting van de uiterste vezel van de as aan te passen.

Borstel-principe

Dit laatste principe heeft een algemene geldigheid.

Met een reeks sleuven in één richting kan een oplegvlak zich aanpassen aan "uitzetting" van het opgespannen li-



Figuur 134b.

chaam in de richting loodrecht op de sleuven. Met twee reeksen sleuven (onderling loodrecht) is elke aanpassing in het vlak (x , y en θ) mogelijk.

In plaats van ingefreesde sleuven kan men ook een "spijkerbed" nemen van op een grondvlak opgelaste of opgesoldeerde pennen of in een veld van geboorde gaten ingelaten pennen. Deze worden dan gezamenlijk kops vlak geslepen om zo het eigenlijke "oplegvlak" te vormen.

Hiermee kan men uitzettingen opvangen tengevolge van ongelijke temperatuur of ongelijke uitzettingscoëfficiënt, of ongelijke rek door buiging, trek of torsie of door ongelijke dwarscontractie ($\epsilon_{dwaars} = -\nu \cdot \sigma_d / E$ waarin ν de dwarscontractiecoëfficiënt van Poisson is).

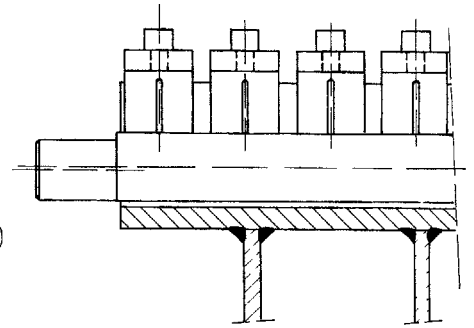
Symmetrisch inklemmen

In inklemconstructies leidt men een belasting door middel van wrijving door; de figuren 135a en 135b zijn daarvan voorbeelden. In figuur 135a is de bladveer aan de rechterzijde zeer stijf verbonden met de constructie; aan de linkerzijde bepalen de bouten op buiging de (zeer veel lagere) stijfheid; er is slechts één inklemvlak effectief.

Figuur 135b toont een in dit opzicht betere constructie. De beide inklemblokken vormen een *even stijf* geheel met de overige constructie.

Beide hebben twee vrijheidsgraden vrij (x , ψ), zodat beide inklemblokken zich naar de aanliggende vlakken kunnen instellen.

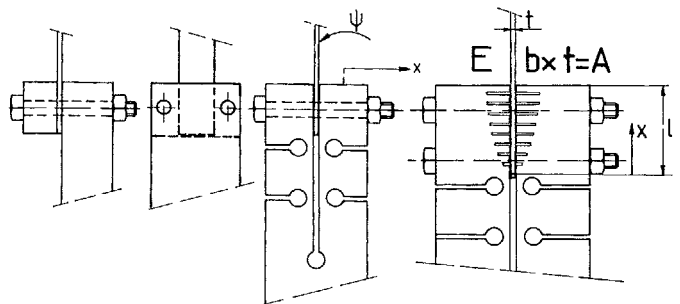
Met een "borstelbed" door zaagsneden aangebracht in de klemvlakken is een hysteresisarme inklemming te re-



aliseren volgens figuur 135c. De klemkracht kan in het midden van het borstelbed staan, zodat de druk gelijkmatig verdeeld is. In dat geval kan elk van de "vingers" (mits die op vaste steek staan en even breed en dik zijn) evenveel dwarskracht opnemen. Het verloop van de stijfheid langs de inklemming wordt bepaald, analoog aan dat van de as-naaf-verbinding. De stijfheidsgradiënt ($\gamma = dc / dx$) is $\gamma(x) = 2EA / x^2$.

Het ligt voor de hand de gewenste stijfheid te verkrijgen door elke vinger een aangepaste lengte respectievelijk gleufdiepte te geven (c_i is evenredig met $(\ell_i)^{-3}$). Een aantrekkelijke uitvoeringsvorm van zo'n klemhelft is dan de opbouw uit gestapelde staalplaatjes met dunne tussenplaatjes van aangepaste lengte, met bouten stijf op elkaar getrokken of doorgesoldeerd. Vervolgens aan twee zijden vlakgeslepen zodat via aandrukstukken de twee klemhelften in gebruik onvervormd tegen elkaar getrokken kunnen worden.

Overigens geldt ook hier: als wat meer axiale vering van de te klemmen strip geen bezwaar is, kan men alle vingers even lang nemen en daarbij voor lief nemen dat de voorste vingers relatief overbelast worden (minder naarmate de vingers elk slapper zijn ten opzichte van de stijfheid EA/ℓ van de strip. Het



Figuur 135a.

Figuur 135b.

Figuur 135c.

Constructies voor het nauwkeurig bewegen en positioneren (12)

aantal vingers kan men dan toch nog groot kiezen; dit opent de weg naar stijve en hoogbelastbare inklemmingen die toch uitzonderlijk hysteresisarm zijn. Bij extreem hoge belasting van de strip kan het nuttig zijn de klembouten iets voorbij het midden aan te brengen, zodat de klemdruk op de strip afneemt naarmate de reeds overgedragen trekkracht groter is.

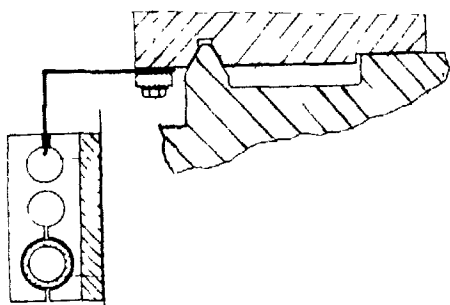
Wel moet de resterende aanlegdruk op de laatste (langste) "vingers" nog groot genoeg zijn om de dwarskracht op te kunnen brengen die minstens nodig is om de vinger op buiging de rek van de strip zonder slip te laten volgen.

Het inklemmen van een op buiging belaste bladveer

Een op dwarskracht en buiging belaste ongeklemde bladveer raakt in principe zijn buigspanning (dus zijn trek-, respectievelijk drukspanning in de uiterste vezels) in de inklemming kwijt doordat de klemkrachten de kromtestraal naar oneindig drukken. Toch zou ook daar inzagen (draadvonken) van het klemvlak tot een borstelbed, zeker vlak bij de inklemming, zinvol kunnen zijn.

Arrêteren door middel van inklemmen

Arrêteren is in eerste instantie niets anders dan vasthouden, fixeren van een eenmaal bereikte plaats. Veelal geldt dit ten opzichte van een beweging met één graad van vrijheid, bijvoorbeeld een draaitafel of slede. Gebruikelijk is te arrêteren door vastklemmen met excenter of schroefdraad, doch dit betekent in principe een belasting met deformaties en toenadering tot het oplegvlak. Hetgeen men zo in bewegingsrichting wil fixeren verplaatst men in dwarsrichting; bijvoorbeeld bij het vastzetten van de losse kop van een draaibank. Zo'n losse kop is dan "zeer



Figuur 136.

goed" als hij net evenveel krombuigt (en dus bij de conuspunt omhoog wipt) als hij door het aantrekken van de klem inevert en nadert tot het oplegvlak.

In figuur 136 is afgebeeld de fixatie van een axiale verplaatsing zonder belasting van de oplegging en geleidingen die de overige vrijheidsgraden blokkeren. Aan de slede is een omgezette bladveer, met de vouwlijn in de te fixeren bewegingsrichting, stijf bevestigd. Die glijdt door de bekken van een vast opgestelde tang of rij tangen – hier gemaakt door inboren en inzagen van een massief stalen blok. Deze tangen sluiten zich als men perslucht toelaat in een door die tangen gevoerde dunwandige slang.

Symmetrie in lijm- en klemverbindingen

Positioneren houdt in het *meten*, het *manipuleren* en het *fixeren*.

Het fixeren na het instellen mag geen verplaatsing veroorzaken en de fixatie mag evenmin een bron van, eventueel later aan het licht tredende, hysteresis vormen.

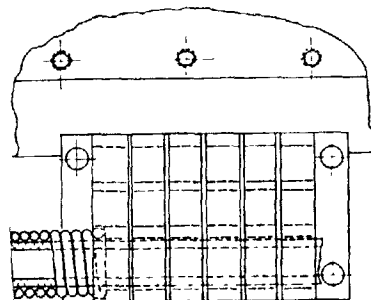
Verplaatsingen bij het inklemmen zijn niet geheel te voorkomen. We verdiepen ons daarom in het probleem hoe deze zo goed mogelijk zijn te beperken.

Toenadering loodrecht op het klemvlak

In de eerste plaats is er de toenadering in de richting loodrecht op het klemvlak. Figuur 136 geeft een voorbeeld waarbij, door tussenschakeling van een elastisch element, de loodrechte toenadering geen invloed heeft op de te fixeren vrijheidsgraad.

Verplaatsingen evenwijdig aan het klemvlak

Moeilijker te ondervangen is de verplaatsing evenwijdig aan het contactvlak. We moeten hierbij onderscheid maken tussen las-, lijm- en bout-



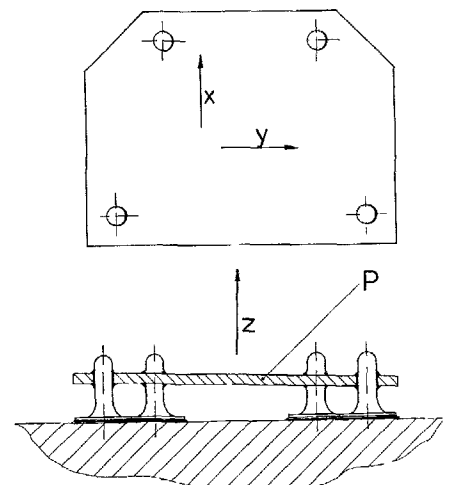
klemverbindingen.

Bij *lassen* kunnen uitzetting en krimp symmetrisch gehouden worden door symmetrische materiaalverdeling rond de lasplaat, mits die zich zover uitstrekt dat de temperatuur- en spanningsverdeling symmetrisch blijft tot ruim nadat de las gestold is. De las geeft wel een dwarskrachtverplaatsing door thermische uitzetting, maar die komt in het ideale geval na afkoelen weer terug op nul.

Vooraf in grootserie en massafabricage is laserlassen soms de beste propositie vanwege de zeer snel gelegde (en gestolde) goed reproduceerbare lassen. Desgewenst is het proces in een vast patroon door middel van kantelspiegels en/of glasvezelbundels, mechaniseerbaar. Het proces wordt gekenmerkt door grote precisie en waar nodig kunnen kleine spleten overbrugd worden. Het nadeel is de relatief grote investering (orde 0,1 Mfl) en enige beperking in de keus van metaalcombinaties.

Lijmverbindingen kunnen nog beter voldoen aan hoge nauwkeurigheidseisen, zeker als men bereid is eventuele spleten te overbruggen met "hulpstukken". Zie figuur 137 waar plaat P op een grondvlak wordt gefixeerd met lijm en tussenschakeling van heel goedkope felsbusjes: x , y en θ worden overbrugd door glijden van de flensjes over het vlak, en z , ϕ en ψ door verschuiving van de busjes in de gaten van plaat P.

Krimp van de lijm wordt door dergelijke "hulpstukken" geneutraliseerd. Op



Figuur 137.

zichzelf zou namelijk krimp van de lijm in een ringvormige spleet aanleiding zijn tot scheef trekken. Ook in het lijmvlak moet men streven naar symmetrie; bij een lijm-"spot" zelfs naar cirkelsymmetrie. Op deze wijze werden tweezijdig geetste individuele rasters op collimatorplaten gelijmd met rotatiesymmetrische "spotlasjes" verkregen door injectie van lijm in geetste holtjes conform figuur 138

Een dergelijke fixatie leent zich voor eenmalige toepassing maar is ook goed mechaniseerbaar.

Nadelen zijn: de noodzakelijke vóórbe- werking (reininging) van de te lijmen oppervlakken, het aanbrengen van de lijm en de droogtijd.

Overigens zijn er lichtgevoelige lijmen met belichtings- (tevens uithardings) tijden in de orde van 1 sec en worden momenteel snelle niet vervuilende lijm- applicatiemethoden ontwikkeld.

Bout-, fels- en klemverbindingen worden nog steeds het meest gebruikt. Om schuifkrachten te weerstaan is een zekere aandrukkracht vereist.

In figuur 133b wordt dit gedaan door een zo groot mogelijke druk op een zo klein mogelijk vlak uit te oefenen. De drukspanning leidt tot compressie $\epsilon = \sigma/E$ en vanwege de dwarscontractiecoëfficiënt ν tot een relatieve zijdelingse uitzetting $\epsilon_d = \nu\sigma/E$. Over de lengte x van de door druk belaste zone gesommeerd levert dat een onvermijdelijke dwarsverplaatsing $\Delta\ell = x\nu\sigma/E$ op.

Klemt men op een strook met de afmetingen b maal $2x$ dan is $F = \sigma \cdot b \cdot 2x$ en $\Delta\ell = \nu \cdot F / (2bE)$.

Klemmen over een smalle lange zone kan dus helpen (b groot!).

Figuur 139 toont hoe een op twee doorgetrokken aluminium strippen gelijmd de laser gemanipuleerd in drie vrijheidsgraden is vastgezet door 2 x 2 geknikte "deurtjes" klem te zetten in twee rechthoekige sponningen van het huis.

De deurtjes hadden drie rijen gaatjes en waren over de middelste rij geknikt, zodat ze niet onbelangrijk korter waren dan in gestrekte toestand. Ze werden twee aan twee in hun kozijn gezet op de aangegeven wijze en tegen elkaar vlakgeknepen. Ze klemmen daarbij de gemanipuleerde strippen tegen de randen

van het kozijn en de dammen tussen de gaten gaan onder invloed van de daar geconcentreerde axiale kracht (gecombineerd met de buigingsvloei) op druk vloeien. De strippen zitten dan geklemd met een vrij scherp gedefinieerde kracht, over de volle breedte en over een zo smal mogelijke zone.

Bovendien is in dit geval de zijdelingse expansie symmetrisch (links en rechts van het te positioneren object), zodat de plaats goed gedefinieerd blijft.

Afstand tussen klemzones en plaatdikte

In het algemeen kan men de ongewenste verplaatsing $\Delta\ell$ (orde van grootte bijvoorbeeld $1 \mu\text{m}$) tegenwerken door symmetrisch te construeren. Maar als de tussenafstand (2ℓ) tussen de twee klemzones groot is en de dikte t van de strip gering, dan wordt de drukkracht in de strip die nodig is om $\Delta\ell$ te compenseren (volgt uit $\Delta\ell/\ell = \epsilon = \sigma_d/E$) groter dan de toelaatbare knikkracht en wipt de strip op.

Zelfs een $\Delta\ell$ van $1 \mu\text{m}$ leidt dan snel tot ettelijke tienden millimeters "wind".

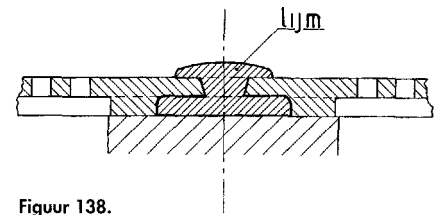
Het doorleiden van een aandracimoment

Het klemmen van een dunne metaalstrip met een rij bouten lijkt wel heel ongewenst.

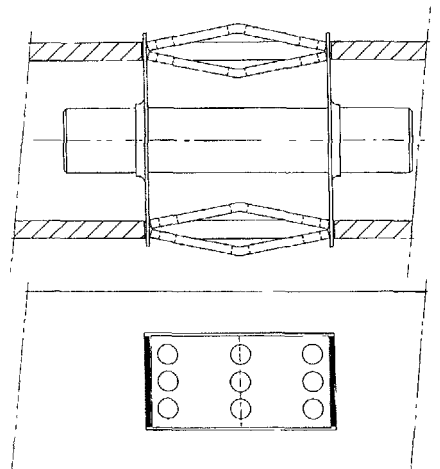
We hebben radiale expansie van onder elke boutkop uit, concentratie van spanningen naar elke bout toe, wellicht "wind" in de strip tussen de bouten onderling. Bovendien is elke aangehaalde bout aanvankelijk vol wrok over wat hem bij het aanhalen is aangedaan. De sleutel oefende uit de som van twee ongeveer even grote momenten: kopwrijving + draadwrijving. Als de sleutel wordt weggenomen keert de kopwrijving van teken om en tracht in de steel het oude draadwrijvingsmoment te handhaven.

Via de te klemmen strip worden die koppels doorgeleid naar de schroefdraad.

Daarnaast zijn er nog herinneringen aan dwarskrachten. het sleutelmoment zal wel geleverd zijn door een kracht op een arm en de boutkop moest via de elastische steel voor de tegenkracht zorgen. Als dit zich later herstelt - bijvoorbeeld bij tijdelijk teruglopende bouttrekkracht als gevolg van verschil in uitzettingscoëfficiënt van stalen



Figuur 138.



Figuur 139.

bouten en aluminium strip - zal de boutkop slippen over de strip of de strip over de ondergrond?

Conclusie: onder boutkoppen moet een gemeenschappelijke dekplaat liggen die koppels (uit kopwrijving) opneemt en zo mogelijk ook dwarskrachten. Liefst moet de eigenlijke strip dan geklemd worden over een smalle lange zone door middel van een lijst of richel op die dekplaat.

Een volgende stap wordt gezet als de dekplaat in zijn vlak vast verbonden is met de ondergrond, zodat hij echt dwarskrachten en koppels van de bouten kan opnemen en doorgeven naar de schroefdraad in de ondergrond. Nu gaat de dekplaat bijdragen aan de plaatsinformatie van de strip. Echt goed belastbaar is die dan pas als de stijfheid (in het vlak) van de ondergrond en dekplaat gelijk zijn, zoals aangegeven in de figuren 135a, b, c.

"Constructies voor het nauwkeurig bewegen en positioneren" is een selectie uit de verzameling constructieprincipes die op initiatief van Prof. ir. W. v. d. Hoek in 1962 is opgezet en die nog steeds wordt uitgebreid. Door ir. P. C. J. N. Rosielle en E. A. G. Reker (TU-Eindhoven) is speciaal voor de lezers van *Mikroniek* een selectie gemaakt die in 18 afleveringen wordt gepresenteerd.

Bijdragen van lezers als kritiek, suggesties of eigen ervaring worden door de auteurs op prijs gesteld.