

METALLERS SLID VED GLIDNING

Slid kan defineres som uønsket fjernelse af materiale fra overflader, der arbejder mod hinanden. På trods af den ret simple betegnelse dækker begrebet slid over forskellige fænomener såsom adhæsion, abrasion, udmattelse og korrosion. Hvordan og hvorfor slid optræder skyldes mangfoldige faktorer, kun slutproduktet: "den uønskede fjernelse af materiale" er fælles.

Indlægget her beskriver forskellige slidmekanismer ved glidning mellem 2 metalliske overflader med særlig vægt på de metallurgiske aspekter.

KONTAKT MELLEMLER OVERFLADER

Når to overflader bringes i kontakt med hinanden, hviler de på enkelte høje punkter. Fladetrykket i kontaktpunkterne er meget stort, og flydespændingen overskrides i et eller begge af materialerne. Der sker plastisk deformation, indtil nye modstående punkter kommer i berøring, og det samlede kontaktareal er tilstrækkeligt til at bære belastningen.

Uanset hvor glatte overfladerne måtte være, kan det for metalliske materialer vises

- at såvel plastiske og elastiske deformationer kan forekomme
- at dette praktisk taget er uafhængigt af mikrogeometrien i kontaktpunkterne og materialernes mekaniske egenskaber
- at det virkelige kontaktareal er mindre end det tilsyneladende.

For en del materialer er der en lineær sammenhæng mellem flydespænding og hårdhed. For moderate fladetryk kan man få et groft overblik over det virkelige kontaktareal A' fra ligningen

$$A' = \frac{\text{belastning } kp}{HV \text{ } kp/mm^2}$$

Fig. 1 repræsenterer forskydningsspændingsfordelingen under en kugle mod et plan. Det ses heraf, at T_{\max} forekommer et stykke under overfladen. Antages plastisk deformation at ske for $T = k = \frac{1}{2} \sigma_F$ (trækflydespændingen) kan det vises, at T_{\max} antager denne værdi, når det maksimale tryk P_0 har værdien $P_0 = 3,1 \cdot k, /1/$, svarende til et middeltryk $P_m \sim 2 \cdot k = \sigma_F$. At der ikke sker plastisk deformation for $P_0 = \sigma_F = 2 \cdot k$ skyldes det overlejlrede hydrostatiske tryk i punktet for maks. P_0 (trykspændinger i x, y og z retningen).

Det fremgår også af fig. 1, den evt. plastiske flydning under overfladen begrænses af, hvad der tillades af deformationer i det omhyllende endnu elastiske materiale.

Ved stigende belastning øges den plastiske zone, indtil den når ud til overfladen. Dette sker for middeltrykket $P_m \sim 6 \cdot k \sim 3 \sigma_F$ d.v.s. for belastninger betydeligt større end dem, der fører til begyndende plastisk deformation under overfladen.

Når deformation erkendes på overfladen, er P_m identisk med brinellhårdheden d.v.s. i overensstemmelse med den velkendte tommelfingerregel:

$$\text{hårdhed} = 3 \times \text{flydespænding}$$

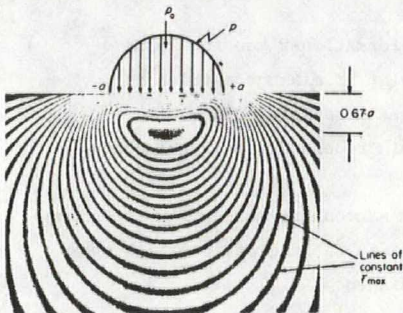


Figure 1 Actual isochromatics obtained for the contact of a cylinder and a plane due to normal load alone /1/

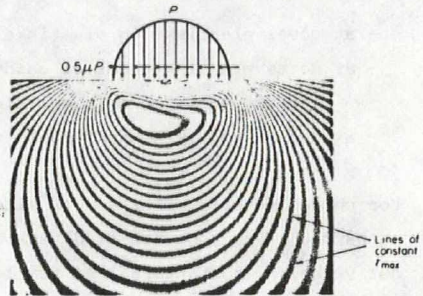


Figure 2 Actual isochromatics obtained for the contact of a cylinder and a plane due to combined normal and tangential loads where $T = 0.5\mu P$ /1/

Fig. 2 viser samme situation som 1 blot med tilføjelse af en tangential kraft (friktionskraft). Det ses heraf, at området med maks. forskydningspændinger nu ligger nærmere overfladen, og at synlige plastiske deformationer lettere finder sted. Med stigende tangentiell spænding nærmer den plastiske zone sig mere og mere til overfladen. Dette er bl.a. også vist i /2/ og /3/ udfra sliplinieanalysen. For friktionskoefficienten under 0,5 ligger den plastiske deformerende zone endnu under overfladen for værdier af $P_0 \sim 4 \times k$ ($= 2\sigma_p$) som vist i fig. 3.

Tangential kræfterne opstår, når de 2 overflader bevæges relativt og de skyldes principielt adhæsion mellem overfladerne og deformation af sammenlåste overfladehypper.

Adhæsion er udtryk for bindinger mellem atomstrukturen i 2 overflader, der bringes i intim kontakt. Adhæsion opstår ikke kun mellem ens materialer, men også mellem forskellige materialer.

Deformation af sammenlåste hypper kaldes også pløjning, hvilket skal dække over, at høje (hårde) punkter på den ene overflade mases lidt ned i den modstående (blødere) overflade. Ved relative bevægelser opstår en "trykbølge" foran punktet med trykspændinger og et "kølvand" med trækspændinger.

SLIDTERMINOLOGI

Sliddet, den "uønskede bortfjernelse af materiale", kan ytre sig på mange måder. For at få et bedre overblik over terminologi og de faktorer og forhold, der styrer sliddet, beskrives først et slidforløb fra tilkøring til udslidning, fig. nr. 4.

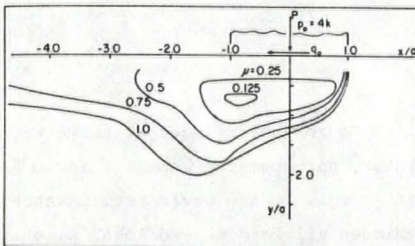


Fig. 3. Steady state plastic deformation regions for different friction coefficients. / 14/

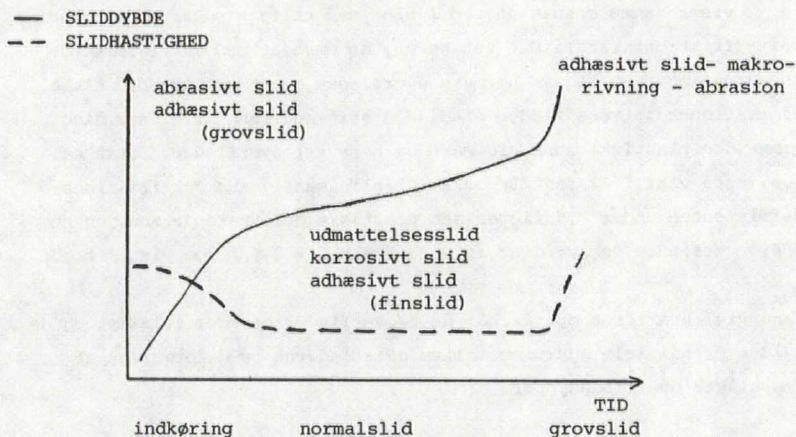


Fig.4: Typisk slidforløb til udslidning

Dele som skal bevæges mod hinanden er fra nye af langt fra plane, glatte og konforme set i mikroskopisk størrelsesforhold. Under indkøringen fjernes de værste knyster ved adhæsivt slid og plastisk deformation.

Temperaturen i kontaktfladerne kan været ret høje i starten bl.a. p.g.a. høj initial friktion, men falder efterhånden som spillerummet øges og knysterne fjernes. Efter vellykket indkøring kan videre slid ske i form af enten adhæsivt slid, udmattelsesslid (delamination), korrosivt slid eller abrasivt slid; oftest dog i kombinationer.

Slidhastigheden efter indkøring vil være betydeligt lavere end før indkøring som vist i fig. 4.

ADHÆSIVT SLID

Den grundlæggende adhæsion mellem to rene overflader af samme krystalstruktur må forventes at være stor, når atomerne kommer i intim kontakt også selv om der eksisterer gitterfejl, lokale kaviteter, vakancer helt ude i de yderste lag /4/. Adhæsionen vil forøges ved lokal plastisk deformation, idet atomerne derved omlejres, så intimere kontakt opstår.

Varme (friktionsvarme) kan også øge atomernes mobilitet tilstrækkeligt til at reorganisere gitterstrukturen, ligesom varme kan betyde lokal rekrytation eller spændingsfriglødning af deformationshærdede områder.

Også mellem uens materialer kan der ske lignende gensidige atomforandringer, omend de er svagere end mellem ens materialer. I mange slidtilfælde er det derfor ikke et spørgsmål om hvorfor og om adhæsion forekommer, men om hvorfor det ikke altid er tilfældet. Det skyldes enten overfladefilm, korrosionsprodukter, rester af smøremidler etc. eller udløsning af elastisk deformation, der kan overvinde de interatomare tiltrækningskræfter.

Adhæsion beskrives ofte i litteraturen som koldsvejsninger, men det må godt opfattes i gåseøjne. Mest sandsynligt er det en fastlåsning af modstående glideplaner og dislokationer i overfladen, der i sjældne tilfælde af blottet overflade, uden film etc. fører til intim atomar adhæsion. Normalt vil der på en metallisk ren overflade momentant dannes et monomolekylært lag, der hurtigt vokser til 5-50 molekylelag, så selv helt rene overflader har ikke store chancer for at overleve som sådanne inden næste kontakt med den modstående flade indtræder.

Udfra plasticitetsteoretiske overvejelser vil "sammensvejsningerne" vokse, hvis de plastisk deformerede kontaktflader udsættes for tangential forskydning /4/. Dette udnyttes bl.a. ved koldtryksvejsning /5/. I praktiske slidtilfælde vil forureninger på overfladerne reducere forskydningsstyrken af svejsningerne, så der sjældent sker total sammensvejsning.

Vellykkede "koldsvejsninger" kan opstå lokalt, og afhængigt af svejsemetallurgien kan det føre til dannelsen af små eller store slidfragmenter som vist i tabellen her.

	Forskydnings- brud	Slid	Eksempel
A Svejsning svagere end begge materialer	i selve svejsning	meget lille	tin mod stål
B Svejsning stærkere end det ene og svagere end det andet	i det svageste materiale	stort	stål mod bly
C Svejsning stærkere end begge grund- materialer	kan forekomme i begge	meget stort	rustfrit stål mod rustfrit stål

Ændring fra meget lille til stort slid i tilfælde A og B kan være en faktor 1000, hvorimod friktionskoefficienten stort set er uændret.

Det store slid i eks. C skyldes dels deformationshærdning af svejsnezonerne, idet toppene mases ind i hinanden og dels deformationshærdning, når svejsningerne skal rives over.

Foruden svejsemetallurgi og "overfladeurenheder" spiller materialernes mekaniske egenskaber også en rolle for det adhæsive slid. Tidligere er vist, at plastisk deformation var mulig, når middeltrykket P_m i kontaktfladen var ca. lig med flydespændingen σ_F eller svarende til ca. $1/3 H$ (indtrykningshårdheden) for stål (og en del andre metaller). Udtrykt i ord svarer det til, at de plastiske zoner under kontaktpunkterne begynder at interferere ved nominelle belastninger $\sim 1/3 H$, så hele undergrunden bliver plastisk /1/. De klassiske friktionslove sættes ud af funktion, og der opstår meget kraftigt slid (sammenrivninger, grov slid). Dette forhold fremgår klart af fig. 5.

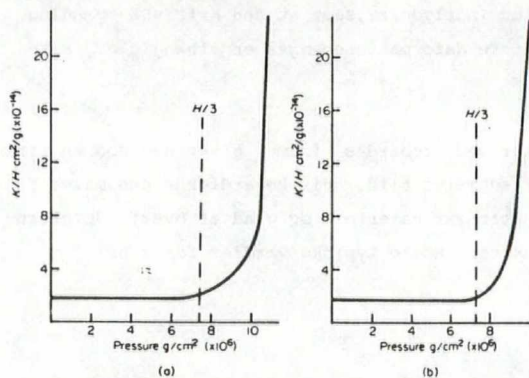


Figure 5. The variation of wear coefficient with apparent pressure for steel: (a) Brinell hardness 223; (b) Brinell hardness 430 /7/

I normalslidsområdet (d.v.s. inden makroplastisk flydning kan erkendes), har man opstillet empiriske formler for adhæsivt slid, bl.a. Archard's ligning /6/:

$$Q = k \frac{P L}{3 \delta_F} \quad \text{hvor}$$

Q = total slid volumen

P = belastning

L = totale slidvej

δ_F = flydespænding i det blødeste materiale

k = proportionalitetsfaktor (sandsynlighedsfaktor)

Formlen er bygget op som en sandsynlighedsteori, der siger, at hver gang to modstående toppe mødes, er der en vis sandsynlighed for, at der dannes en slid partikel. Sliddet er proportionalt med slidlængden og belastningen og er omvendt proportional med flydespændingen (\sim hårdheden).

Der findes modifikationer af ovenstående, bl.a. har Rowe /7/ taget hensyn til overfladefilms indflydelse, samt at den kritiske spænding for makroskopiske plastiske deformationer også er afhængig af friktionskoefficienten.

Trods de åbenlyse mangler ved Archard's formel giver den dog en rimelig god forudsigelse af adhæsivt slid, hvis k -værdierne kan måles i forvejen for den kombination af materiale og grad af overfladeforurening (smøring), der er aktuel. Nogle typiske værdier for k er:

Rene, tørre metalliske overflader	$k = 5 \cdot 10^{-3}$
Dårligt smurte overflader	$k = 10^{-4}$
Velsmurte overflader	$k = 10^{-6}$

k -værdierne viser, at hver top skal i indgreb mange gange før et slidfragment dannes. De viser også, at enhver form for smøring vil være gavnlige. Mens friktion måske kun nedsættes med en faktor 10, kan slidet reduceres mange gange mere, og ofte kan smøring helt eliminere sammenrivninger og grovslid.

UDMATTESLID

Adhæsionsteorien kan ikke forklare mikrostrukturens indflydelse på slidbestandigheden, men er nødt til at lade det indgå i faktoren k . Flere forskere /8/, /9/ og /10/ har arbejdet med at kæde normal slid sammen med udmattelsesfænomener d.v.s. at betragte slid udfra revne-

initiering og revneudbredelseskriterier og bl.a. /10/ har sammenstillet en samlet delamination theory, som også byder på mange fordele når slid skal beskrives v.h.j.a. metallurgi.

Når en hård top forskydes henover overfladen, sker der plastisk deformation i en zone under kontaktstedet som vist tidligere. Der vil være en trykzone foran toppen og en trækzone efter denne. Trækzonens udstrækning og spændingernes størrelse er hovedsageligt styret af normalbelastningen og forskydningskræfterne i overfladen, d.v.s. friktionskoefficienten, som igen er styret af adhæsion og indtrykningshårdheden (idet pløjningsbidraget mindskes med øgende hårdhed). Materialet lige under overfladen udsættes for vekslende belastninger, hver gang en top passerer.

Styret af dislokationsdynamik vil den akkumulerede plastiske deformation til sidst føre til dannelsen af mikrorevner (ved slaggeindeslutninger, sekundære udskillelser, fasegrænser m.m.) eller at allerede eksisterende mikrovoids begynder at vokse. Revnedannelsen sker under overfladen, hvor det overlejrede hydrostatiske tryk ikke hindrer dette og hvor de akkumulerede plastiske deformationer er store nok til det.

Efter revneinitieringen vokser revnerne videre og det er påvist, /11/, at lineær elastisk brudmekanik kan bruges til at beskrive revnevæksten.

V.h.j.a. denne teori er det lykkedes at skabe forbindelse mellem overfladelagens metallurgi og slidforløbene. I virkeligheden er adhæsionsteorien passende tilgodeset også i delaminationsteorien.

Generaliserende kan siges, at slid i rene metaller og en-fase legeringer er styret af revneinitieringstilbøjeligheden der er stærkt afhængig af deformationsgraden og - hastigheden, d.v.s. friktionskraften og indtrykningshårdheden. Friktionskraften er selv en funktion af adhæsion og flydespændingen (og dermed også hårdheden). Korngrænseudskillelser, krydsslip og stablefejl, rekrytallisationskinetik kan lædere denne sammenhæng, enten ved at lette revneinitiering eller ved helt at undertrykke denne.

I flerfaselegeringer og legeringer med slaggeindeslutninger og sekundære udskillelser sker revnedannelsen relativt villigt i den plastiske zone, hvorfor revnevækst her bliver den kontrollerende faktor, men også her spiller hårdhed og friktionskoefficient ind. Bl.a. medfører stor hårdhed og lav friktionskoefficient, at revneinitieringen sker i mindre afstand fra overfladen, så slidvolumet bliver mindre.

KORROSIVT SLID

Bringes korrosion eller oxidation med ind i billedet, fås yderligere varianter af foranstående slidmekanismer. Det er blevet efterprøvet, at korrosionshastigheder for nys deformede og nys blotlagte overflader kan være op til 1000 gange større end normalt, og det er faktisk let at forestille sig en proces, hvor korrosionsprodukterne hele tiden fjernes og gendannes. Det kan hævdes, at al slid begynder som korrosivt slid, idet alle de tekniske overflader er overtrukket af korrosionsprodukter i form af oxider etc. Om sliddet fortsætter som udmattelseslid (evt. korrosionsudmattelse) adhæsivt slid eller abrasivt slid (omtales senere), bestemmes af faktorer som oxidationstilbøjelighed og -hastighed, oxidernes stabilitet i relation til belastningsmønsteret, forskelle i termisk udvidelseskoefficient, absorption m.m.

En speciel form for korrosivt slid er fretting, eller gnavpasningsrust, som det også kaldes. I forenklet version kan det fremstilles som små "sammensvejsninger", der udsættes for vekslende forskydningspåvirkninger. Ved små relative bevægelser kan det føre til initiering af udmattelsesrevner som tidligere omtalt. Hvis revnerne løber sammen, dannes løse fragmenter, der kan forårsage ravage siden hen.

Forekommer slip, vil der hele tiden ødelægges og gendannes oxider. Hvis fretting produkterne ikke kan undslippe, hindres de relative bevægelser, og der behøver ikke ske mere, med mindre udmattelsesrevnerne udvikler sig til brud, eller at maskindelene af og til skal bevæges mere end normalt. Hvis korrosionsprodukterne hele tiden undslipper, stiger spillerummet etc., og det kan føre til skade i form af vibrationer

eller tab af tilholderkraft etc.

Fretting kan modvirkes ved at forøge fladetrykket (formindske arealet), så relativ forskydning hindres. Materialerne bør vælges, så de ikke så let koldsvejser, d.v.s. med umage krystalstruktur. Det ene materiale må gerne være blødt med ringe deformationshærdning og lav rekrystallisationstemperatur.

ABRASIVT SLID

Alle de hidtil nævnte slidmekanismer kan producere slidfragmenter, oxider etc., der selv kan forårsage yderligere slid. Der kan også være tale om sand, støv og andre udefra kommende urenheder, der forårsager abrasivt slid. I princippet kan abrasivt slid illustreres som slibning med sandpapir. En lille del af de slibende korn har en sådan orientering, at de danner effektive skær mod overfladen, der kan fjerne materiale ved en spåntagningsproces. Resten pløjer sig bare igennem materialet. Richardson /12/ har vist, at når hårdheden i overfladen H_m er større end 0,8 gange hårdheden af de slidende metalliske partikler H_{Abr} begynder sliddet at skifte karakter fra rent abrasivt slid til adhæsivt eller udmattelsesstyret slid. Ved hårdhed $1,3 \times$ hårdheden af partiklerne forekommer abrasivt slid næsten ikke. For keramiske partikler, d.v.s. oxider, carbider, silicater etc., gælder ovenstående ikke direkte. På grund af keramernes lavere elasticitetscoeff., E , flyttes hårdhedsgrænsen for skift til en mildere slidform op til 2,5 i stedet 1,3. I det hele taget er der meget, der tyder på, at H/E er en vigtig parameter ved slid /12/, idet hårde partikler kan passere v.h.j.a. elastisk eftergivenhed.

Når $H_m/H_{Abr} < 0,8$, kan der opstilles en lineær sammenhæng som vist i fig. 6, /13/, mellem rene metalleres hårdhed (i udglødet tilstand) og slidbestandighed. Deformationshærdning har ikke nogen indflydelse på slidbestandigheden, hvilket blot indikerer, at overfladen ved deformation hærdes til maks. værdi ved abrasivt slid.

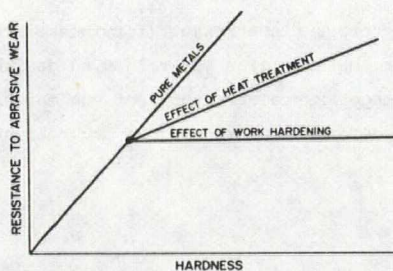


Fig. 6: Sammenhæng mellem hårdhed (i udglødet tilstand for "pure metals") og slidbestandighed. Efter /13/.

Specielt ved transport af grus, sten etc. og ved formalingsprocesser kan der forekomme "hamrende slid". Det er i sådanne situationer vigtigt, at de valgte overflader kan tåle slagpåvirkninger, foruden at de har passende hårdhed til at modstå normalt abrasiv påvirkning.

AFSLUTNING

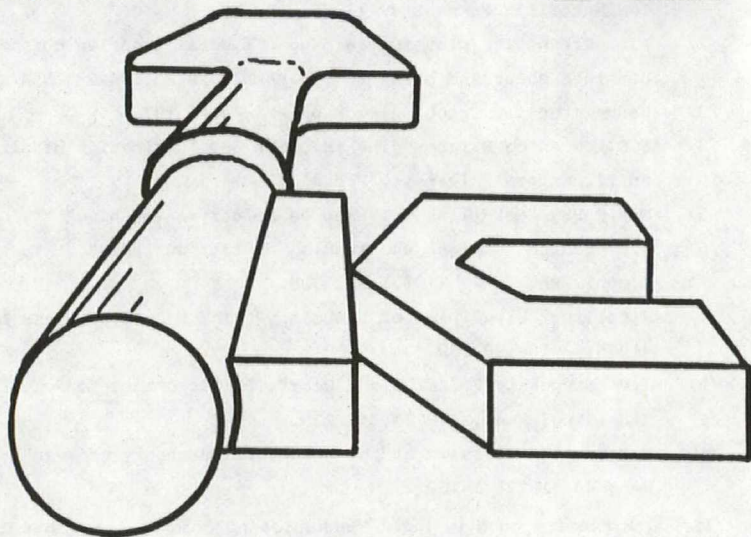
Indenfor de sidste 10 år er der sket ret stor udvikling indenfor den egentlige slidforskning, og mange nye slidteorier har set dagens lys. Den teori, som for øjeblikket bedst beskriver og sammenkæder slid og metallurgi, er delaminationsteorien, som er baseret på dislokationsdynamik i overfladelagene. At der alligevel her er ofret en del opmærksomhed på andre teorier skyldes, at disse udtrykker en række tomme regler, der i det daglige er mere håndterlige end dislokationskriterier.

REFERENCER

- /1/ J.Halling "Principles of tribology"
The Macmillan Press Ltd. (1975)
- /2/ A.P. Green "The plastic yielding off metal junction due to
combined shear and pressure". I.Mech.Phys.Solids 2 (1954) 197-211
- /3/ Wanheim et al, Tribologimøde på AMT, juni 1976.
- /4/ F.P.Bowden og D.Tabor "The friction and lubrication of slids"
Pt.II. Oxford University Press (1964)
- /5/ Niels Bay "Metallisk friktion og koldtrykssvejsning".
- /6/ J.F.Archard "Contact and rubbing of flat surfaces"
I.appl. Phys., 24 (1953) 981-988.
- /7/ J.Halling "Principles of tribology". The Macmillan Press Ltd.
(1975), side 98-100.
- /8/ I.V. Kragceki "Friction and Wear", Butterworths, London, 1965.
- /9/ J.Halling, Wear, (1975) 34, 239.
- /10/ N.P.Suh "An overview of the delamination theory of wear".
Wear 44 (1977) 1-16.
- /11/ J-R.Fleming og N.P. Suh. "Mechanics of crack propagation in
delamination wear. Wear 44 (1977) 39-56.
- /12/ R.C.D. Richardson. "The wear of metals by relative soft
abrasives". Wear 11 (1968) 245-275.
- /13/ M.M. Kruschov. "Resistance of metals to wear by abrasion".
Inst.mech.Engvs.Conf. Lubr.and Wear, London 1957, 655-659.
- /14/ S.Jahanmin og N.P.Suh. "Mechanics of subsurface void nucleation
in delamination wear". Wear 44 (1977) 17-38.

KORROSIONSCENTRALEN ATV

Park Alle 345 · 2600 Glostrup
02 - 96 88 00 · Telex 33388



Nøglen til materialeteknisk viden

KORROSIONSCENTRALEN FORETAGER ANALYSER OG UNDERSØGELSER AF BRUD OG HAVARIER - HVAD ENTEN DE SKYLDES MATERIALEFEJL, OVERLAST, KONSTRUKTIONSFEJL, SLID ELLER KORROSION.

KORROSIONSCENTRALEN KAN BISTÅ VED PRODUKTUDVIKLING OG PRODUKTIONSPLANLÆGNING MED SPECIALVIDEN OM MATERIALER, KONSEKVENSANALYSER M.M.

KORROSIONSCENTRALEN KAN HJÆLPE I DEN DAGLIGE PRODUKTION I SAMARBEJDE MED VIRKSOMHEDENS EGNE EKSPERTER.