

DETERIORAREA SUPRAFETELOR PRIN OBOSEALA DE CONTACT



Șef lucr. dr. ing. Rodica T. Munteanu
Universitatea „Transilvania” din Brașov

Absolventă a Facultății T.C.M., secția T.C.M., din cadrul Institutului Politehnic din Brașov (1978). Din 1981, asistent ing. la Universitatea din Brașov, Facultatea de Mecanică, catedra de Rezistența Materialelor și Vibrații, iar din 1991 până în prezent, șef de lucrări cu doctoratul finalizat în decembrie 1999. A publicat: un curs, un îndrumar de laborator și o culegere de probleme în colaborare, 20 lucrări publicate în țară; are un brevet de invenție și 9 contracte de cercetare în colaborare.

REZUMAT. *Lucrarea de față își propune trecerea în revistă a aspectelor principale cu privire la deteriorarea suprafețelor la oboseala de contact.*

Cuvinte cheie: contact, rostogolire, oboseala de contact.

ABSTRACT. *The present paper aims to review the main aspects regarding the deterioration of surfaces because of contact fatigue.*

Keywords: contact, rolling, contact fatigue.

1. INTRODUCERE

Oboseala de contact este un fenomen complex, determinat de foarte mulți factori care sunt într-o intercondiționare. Evitarea deteriorării corpurilor în contact care poate duce la scoaterea din uz a acestora sau chiar la accidente grave, reprezintă o preocupare actuală. Cauzele deteriorării pot fi multiple și se pot manifesta simultan, ceea ce face dificilă constatarea și eliminarea acestora.

Întreaga problemă face apel la domeniul de vârf al științei și tehnicii actuale, cum ar fi: teoria elasticității și contactului corpurilor de revoluție, metodologiile pentru elaborarea unor programe de calcul, modalități statistice specifice de prelucrare a datelor, teoria frecării etc.

În cadrul lucrării s-a urmărit sistematizarea factorilor de intercondiționare a oboselii de contact și câteva elemente de calcul și evaluare cantitativă.

2. FACTORI FAVORIZANȚI

Deteriorarea suprafețelor prin oboseala de contact are la bază solicitările mecanice sau termomecanice ciclice suprapuse mișcării de alunecare, rostogolire, poansonare sau brinelare sau unor combinații ale acestor mișcări. Mișcările predominante sunt de rostogolire sau de rostogolire cu alunecare. Apariția uzării prin oboseala de contact este dependentă de defectele microscopice referitoare la omogenitatea materialului suprafeței (incluziuni

de carburi nemetalice sau goluri) și de defectele suprafeței de frecare provenite din prelucrări mecanice (zgrâieturi, crăpături, pete, gropițe) sau din procesul de uzare de tip adeziv sau abraziv.

Parametrii de intercondiționare a oboselii de contact în cazul unui contact cu rostogolire și alunecare sunt:

- pe suprafață:
 - microdefecte;
 - microfisuri;
 - fisuri (20...25 μm);
 - desprinderi;
 - structuri spongioase;
 - ciupituri (pitting);
 - cojiri (flaking);
 - desprinderi mari (spalling);
 - curgeri plastice;
- din adâncime către suprafață:
 - microdefecte;
 - microfisuri;
 - fisuri;
- proprietățile materialului:
 - modul de elasticitate;
 - duritate;
 - rezistență la oboseală;
- proprietățile lubrifiantului:
 - vâscozitate;
 - indice de vâscozitate;
 - proprietăți reologice;
- sarcina:
 - mărime;

- sens;
- mod de variație;
- viteza;
- adeziunea;
- abraziunea;
- tribocoroziunea;
- eroziunea.

3. MECANISMUL PRODUCERII OBOSELII DE CONTACT

Tensiunile variabile din zona de contact conduc la oboseala materialului. Este cunoscut că majoritatea oțelurilor se comportă la oboseală după curba *Wöhler*, curba 1 din figura 1 fiind specifică ruperii materialelor la solicitări simple repetate, iar curba 2, obosealii superficiale, în special pentru oțeluri cu duritate mai mare de 350 HB.

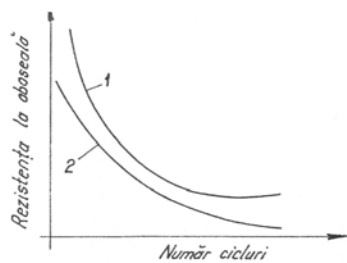


Fig.1

Imperfecțiunile și defectele de suprafață și cele ale materialului de sub suprafața de contact reprezintă puncte slabe. Ca urmare a solicitărilor repetate, în imediata apropiere a punctelor slabe iau naștere puternice concentrări de tensiuni cu modificări structurale de material, cu alunecări și curgeri plastice, inițiindu-se primele microfisuri.

Cazul obosealii simple: tracțiune și compresiune, tensiunile maxime generează deformații elastice; nu există fisuri vizibile.

Schimbările în structura atomică au loc după câteva cicluri de încărcare în puncte separate din material.

Pentru metale, oboseala începe cu cele câteva cristale care pot aluneca cel mai ușor (fig. 2). La aplicarea sarcinii, aceste cristale "slabe" curg inițial, dar, deoarece sunt înmagazinate în materialul elastic, nu afectează diagrama statică tensiuni-deformații a întregului material. În figura 2 se poate observa schema unei structuri cu cristal „slab”.

În următoarele figuri (3, 4, 5 și 6) se vede mecanismul de oboseală la nivel de rețea cristalină:

- schema unui cristal „slab” și „puternic” (fig. 3);

- diagrama tensiune-deformații (fig. 4);
- diagrama încărcare-descărcare cu cristale diferite (fig. 5);
- diagrama încărcare - descărcare policiclică (fig. 6).

Totuși, aceste cristale curg, deși nu este depășită limita de elasticitate a materialului. Dacă materialul este solicitat numai o dată, efectul curgerii este nesemnificativ. Dacă se repetă solicitarea, se produce o zonă de curgere în cristalul „slab”. Cristalul „slab” este înconjurat de cristale „puternice” care sunt orientate astfel încât deformațiile rămân elastice la cele mai mari tensiuni ce apar în timpul aplicării repetate a încărcării.

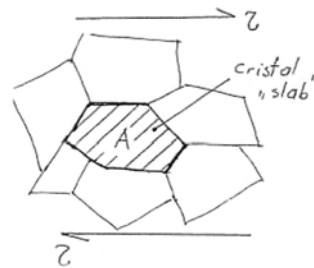


Fig. 2

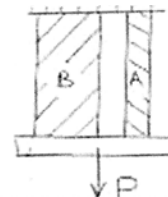


Fig. 3

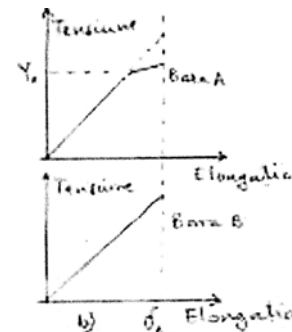


Fig. 4

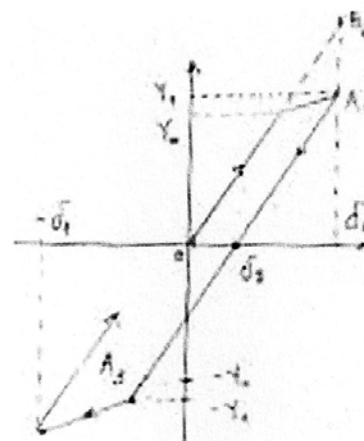


Fig. 5

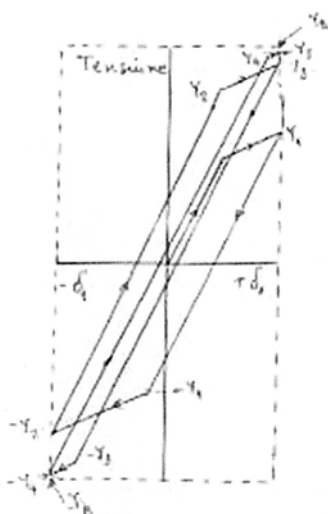


Fig. 6

Un model simplu este cel al unui cristal „slab” A , reprezentat prin bara A , fixat într-un grup de cristale „puternice”, reprezentat prin bara B (fig. 3). Ambele bare au același modul de elasticitate și aceeași lungime, astfel că, la deformații egale, ambele bare au aceleași tensiuni.

Bara A are o secțiune transversală mult mai mică decât bara B și are o tensiune de curgere Y_0 , în timp ce bara B se deformează elastic.

După ce bara A începe să curgă, tensiunile cresc mult mai încet, aplicând o forță care variază între $+P_1$ și $-P_1$, se produce aceeași deformație elastică în cele două bare, ce variază între $+\delta_1$ și $-\delta_1$

Pentru tensiuni mai mici decât Y_0 deformația totală este elastică și tensiunile sunt identice în cele două bare. Când tensiunea depășește Y_0 , bara A începe să curgă și tensiunile din ea cresc încet. La deformația maximă δ_1 , tensiunea în A este corespunzătoare punctului $A_1(Y_1)$, iar în bara B corespunzătoare punctului B .

Dacă modelul este descărcat de la elongația maximă δ_1 , tensiunea în bara A urmează linia A_1A_2 . Când elongația descrește la δ_2 , tensiunea în bara A este zero și, la o elongație zero, bara A începe să curgă în punctul A_3 la o deformație mică. Tensiunea de curgere este $(-Y_1)$, fiind ca mărime identică cu aceea a punctului A_1 , ceva mai mare decât Y_0 . Curgerea din A_3 continuă până ce deformația devine $-\delta_1$. Acest model de eveniment este repetat în fiecare semiciclu de deformație (fig. 6). Pierderile încep să scadă de la ciclu la ciclu, astfel că

tensiunile în bara A cresc cu fiecare ciclu și se apropie de tensiunea perfect elastică, pentru elongația δ_1 . Aceasta explică de ce aplicarea repetată a unei tensiuni mici poate produce o deteriorare progresivă a materialului, când aceeași tensiune aplicată static are un efect permanent imperceptibil.

Dezvoltarea microfisurilor din interiorul materialului și a celor de pe suprafața de contact conduce la apariția de macrofisuri și apoi la dislocarea de așchii de metal, apărând sub formă de „spalling” („microcratere” alungite) sau de „pitting” (crăpături). Când curgerile plastice au loc numai la nivelul asperităților, microfisurile sunt paralele cu suprafața, rezultând exfolieri prin laminare ușoară a metalului, fenomen denumit „microspalling” sau „micropitting”.

Prezența lubrifiantului în zona de contact permite propagarea hidraulică a micropittingului, rezultând fisuri mai mari, iar apoi apariția așchii (model de deteriorare Way).

Un alt model privind apariția așchii de oboseală este modelul clasic Lundberg-Palmgren, potrivit căruia fisura pornește de la un punct slab din interior ca urmare a tensiunii tangențiale ortogonale maxime.

Există și alte modele, care diferă de cel clasic prin locul de inițiere a fisurii și prin tensiunile decisive (de exemplu, modelul Pineghin-inițiere pe suprafața de contact ca urmare a tensiunilor de pe conturul amprenteii de contact, și modelul Popinceanu – inițierea pe sau sub suprafața de contact ca urmare a tensiunilor echivalente din ipoteza Misses-Huber-Hencki).

În procesul de rostogolire, tensiunile de contact sunt concentrate pe o suprafață mică și sunt repetitive, astfel că mecanismele de uzare se bazează pe caracteristicile de material și pe condițiile de lucru, așa cum se poate vedea în figura 7.

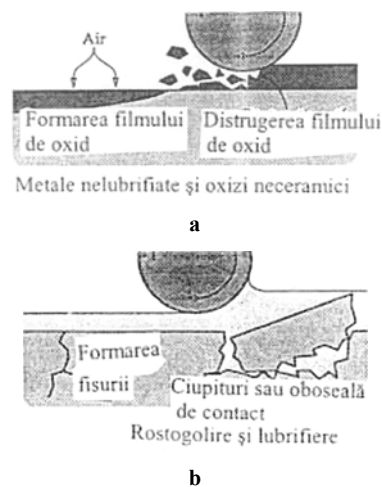


Fig. 7

În cazul în care nu există mișcare de rostogolire și alunecare, dar există vibrații, datorită presiunilor mari din zona de contact apare fenomenul coroziune de contact („fretting corrosion”) manifestat sub forma unor cratere. Aceste cratere constituie surse sigure de oboseală, contribuind la scoaterea ulterioară din funcțiune a cuplei.

4. ELEMENTE DE CALCUL ȘI EVALUARE CANTITATIVĂ.

Prin durabilitatea unui contact supus la oboseală superficială se înțelege numărul de cicluri de solicitare sau numărul de rotații până la apariția primului semn de deteriorare. Datorită faptului că imperfecțiunile și defectele de suprafață și cele ale materialului de sub suprafața de contact sunt variabile aleatorii, durabilitatea unui contact se determină cu de o anumită probabilitate.

Legătura între probabilitatea de supraviețuire R (funcție de fiabilitate) după N milioane de cicluri de solicitare $N = u_r L$, unde u_r este numărul de cicluri de solicitare, L – durata de viață, în milioane de rotații într-un punct al unui element, iar ρ_d – tensiunea decisivă, este dată de o relație de tip Lundberg-Palmgren:

$$\ln \frac{1}{R} = K \rho_d^c Z_0^{-h} V N^e, \quad (1)$$

în care: K este o constantă de material care se determină experimental; ρ_d – tensiunea decisivă; Z_0 – adâncimea la care tensiunea decisivă are valoare maximă; V – volumul de material afectat de tensiune; $V = Z_0 a l$, unde a este semiaxialipsei de contact la contactul liniar; l – lungimea căii de rulare în cazul rulmenților; c, h, e – coeficient de material de rulmenți (tabelul 1).

Tabelul 1

Nr.crt.	Coeficient	Contact punctual	Contact liniar
1	c	31/3	
2	h	7/3	
3	e	10/9	9/8

Detalii cu privire la folosirea relației (1) se găsesc în [5].

5. POSIBILITĂȚI DE REDUCERE A DETERIORĂRII PRIN OBOSEALA DE CONTACT

Fenomenul complex de oboseală de contact este determinat atât de factori constructivi (material, geometrie

și calitatea suprafeței), cât și de factori de exploatare (sarcină, lubrifianț ca tip și mod de administrare și viteza relativă).

Reducerea uzării și materialului de bază. Este o măsură care se referă la metodele de elaborare și tratare a oțelurilor pentru a se obține incluziuni și goluri mai fine și mai rotunjite, orientarea fibrajului în direcția de rostogolire etc.

Durabilitatea, geometria și calitatea suprafeței de contact. Distribuția tensiunilor de pe suprafața de contact liniar dintre două role este uniformă în cazul în care lungimea contactului este infinit de mare. În cazul real, la capetele rolei de lungime finită și mai scurtă apar tensiuni maxime, zonele respective fiind sigure zone „slabe” la oboseala de contact.

Măsurile constructive care scad vârful de tensiuni sunt măsuri de creștere a durabilității. Astfel, pentru corpurile de rostogolire sub formă de role (cilindrice sau butoi), se prevăd extremități conice (1, fig. 8), capete rotunjite cu și fără teșituri (2 și 3), degajări frontale (4) și bombarea căilor de rulare.

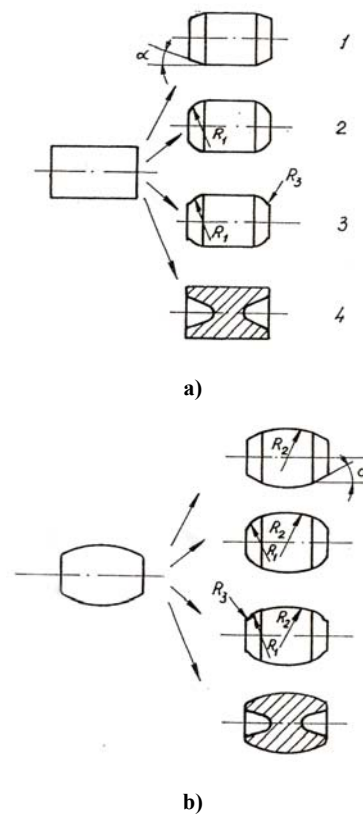


Fig. 8

Trecerea lentă de la o secțiune la alta prin raze de racordare, atât la corpurile de rostogolire, cât și la căile

de rulare (racordarea dintre o zonă de contact liniar și o zonă de contact punctual sau dintre zone cu contact punctual), modifică distribuția de tensiuni, conducând la creșteri importante ale durabilității.

În ceea ce privește influența calității suprafeței de contact (abatere de formă, ondulații și rugozități) asupra durabilității, se remarcă dependența indirectă, prin intermediul regimului de ungere.

Atunci când condițiile de viteză, sarcină, lubrifianț și geometrie nu permit formarea unor pelicule continue de lubrifianț, calitatea suprafeței de contact și, în special, rugozitățile influențează semnificativ durabilitatea. În acest caz, forțele se transmit prin vârfurile rugozităților, rezultând tensiuni tangențiale și normale maxime pe aceste vârfuri, fapt ce conduce la scăderea durabilității, sursele de defecțiuni fiind chiar rugozitățile. Totodată, în acest caz (peliculă discontinuă de lubrifianț) durabilitatea este influențată atât de înălțimea rugozităților, cât și de înclinarea, panta și raza de curbură ale rugozităților, creșterea durabilității este asigurată pentru suprafețe cu rugozitățile cât mai mici și mai uniforme ca înălțime, cu raze de curbură cât mai mari și cu direcția de înclinare perpendiculară pe sensul de rostogolire. Reducerea pantei rugozităților conduce la creșterea durabilității.

Atunci când condițiile de ungere permit formarea unor pelicule continue de lubrifianț, mai mari sau comparabile cu înălțimea rugozităților, calitatea suprafeței influențează puțin durabilitatea.

Durabilitatea și factorii de exploatare. Elementele geometrice și cinematice ale cuplelor punctuale sau liniare și prezența lubrifianțului fac posibilă apariția regimului de ungere EHD. Toate condițiile ce favorizează formarea peliculei continue de lubrifianț sunt utile creșterii rezistenței la uzare prin oboseala de contact.

Condițiile severe de lucru din contactele punctuale și liniare necesită lubrifianți cu stabilitate termică și oxidare. Prezența lubrifianțului în zona de lucru modifică repartitia tensiunilor și, implicit, durabilitatea. Prin efectele de reducere a coeficientului de frecare și de răcire, lubrifianțul conduce la creșterea durabilității, iar prin efectele de concentrare a tensiunilor tangențiale la ieșirea din contact, compresare și pompăre a lubrifianțului în fisura apărută pe suprafața de contact la limita asperităților și corozive, lubrifianțul conduce la micșorarea durabilității. Prezența apei în lubrifianț conduce la scăderea capacității portante, așa cum se observă schematic din figura 4.

Cercetările efectuate în țară și în străinătate dovedesc că rezistența la deteriorare prin oboseala de contact este influențată semnificativ de tipul lubrifianțului și al aditivilor, precum și de parametrul filmului X_h (raportul

dintre grosimea filmului și rugozitatea echivalentă, compusă, a suprafețelor celor două elemente ale cuplei). Acceptând ca indicator al grosimii filmului grosimea minimă din zona de ieșire și ca indicator al rugozității abaterea medie pătratică a înălțimilor rugozităților (σ_1, σ_2), $\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$, se fac următoarele aprecieri asupra influenței parametrului X_h :

- pentru $X_h \leq 1$, suprafețele fac contact, apar deformări la nivelul rugozităților și uzarea este determinată de proprietățile materialelor și de tensiunile hertziene;
- pentru $X_h = 1 \dots 1,5$ apar cojiri, fenomene de uzare, de lustruire, de micropitting;
- pentru $X_h = 1,5 \dots 3$ apare spallingul, ca formă de deteriorare prin oboseală;
- pentru $X_h = 3,5 \dots 4$, durabilitatea este maximă;
- pentru $X_h > 4$, suprafețele sunt complet separate de lubrifianț, însă durabilitatea scade puțin (fig. 9), așa cum a demonstrat experimental Tallian.

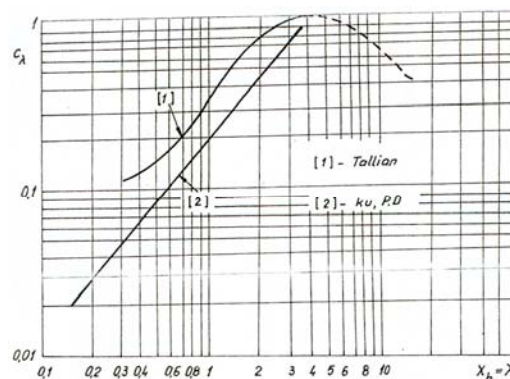


Fig. 9

6. CONCLUZII

Din aspectele prezentate rezultă câteva concluzii:

- presiunea hertziană de contact joacă rolul esențial în apariția fenomenului de oboseală;
- alunecarea nelubrifiată dintre două suprafețe în contact conduce la importante deteriorări ale acestora;
- durabilitatea scade atunci când forța tangențială care produce alunecarea este dirijată în direcția de rulare a celor două suprafețe în contact, atunci când contactul este cu rostogolire;
- prezența defectelor de suprafață sau a incluziunilor este, de cele mai multe ori, nefavorabilă;
- performanțele lubrifianțului dintre două suprafețe în contact, cu privire la creșterea durabilității acestora,

sunt influențate direct de vâscozitatea acestuia și de grosimea stratului aplicat; aditivii anti-uzură au făcut obiectul a numeroase studii cu privire la oboseala de contact, care au condus la rezultate extrem de diverse și dependente de condițiile încercărilor.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Crețu, Sp. *Influența tensiunilor remanente create prin deformații plastice asupra oboselii de contact*, TRIBOTEHNICA, Galați 1978.
- [2] Crudu, I. *Contribuții la studiul influenței tensiunilor normale inițiale asupra distrugerii statice și prin ciupitură (pitting) a contactelor punctiforme*. TEZĂ DE DOCTORAT, Inst. Politehnic Iași, 1969.
- [3] Diaconescu, E.N. ș.a. „Efectul tracțiunii EHD asupra durabilității la oboseala de contact”. Conferința specialiștilor în frecare, ungere, uzare, Ploiești, octombrie 1982.
- [4] Ghiță, E. *Rezistență și durabilitate la contactul corpurilor*. Ed. MIRTON, Timișoara, 2000.
- [5] Munteanu, R., *Contribuții asupra rigidității și oboselii de contact*. TEZĂ DE DOCTORAT, Universitatea „Transilvania” din Brașov, 1999.
- [6] Popinceanu, N., ș.a. *Problemele fundamentale ale contactului cu rostogolire*, Ed. Tehnică, București, 1985.