

FRETING

FRETTING

Jože Vižintin, Mitjan Kalin

Center za tribologijo in tehnično diagnostiko, Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani, Bogiščeva 8, 1000 Ljubljana

Prejem rokopisa - received: 1998-11-10; sprejem za objavo - accepted for publications: 1999-01-25

Ena izmed oblik obrabe, ki znatno zmanjšuje trajnost strojnih delov, je tudi freting obraba. Freting je delovanje, ki povzroča poškodbo, ko se dve telesi v kontaktu relativno gibljeta z majhno amplitudo pomika v tangentni smeri. Obstajajo tri osnovne oblike fretinga poškodb, to so: freting korozija, freting obraba in freting utrujanje. Vendar se v zadnjih letih uporabljata za opis poškodb predvsem freting utrujanje in freting obraba, predvsem v povezavi z različnimi freting režimi, ki opisujejo razmerje med cono mirovanja in zdrsa v kontaktu in s tem definirano poškodbo. Freting obraba in freting utrujanje nastajata praktično v vseh strojih in lahko povzročita dokončno poškodbo tudi na sicer zelo zmogljivih komponentah. Znano je, da število freting poškodb, v nasprotju z drugimi oblikami obrabe, v zadnjih desetletjih ne upada, četudi je bila izvedena vrsta raziskav na tem področju. Seznam možnih poškodb pri različnih strojih je seveda zelo dolg, vendar ga lahko skrbimo na nekaj značilnih primerov, kot so ležaji, sklopke in različni spoji. Glavni vzroki za slabo poznanje fretinga in s tem tudi njegovo odpravljanje so v kompleksnosti samega procesa, različnih vplivih kontaktnih razmer, številnih materialih in okoliških razmerah. Sedaj potekajo glavne raziskave na področju izpopolnjevanja že obstoječih kriterijev pri določevanju poškodb freting utrujanja, njegovem modeliranju, napovedovanju in preprečevanju. Na drugi strani pa obstoji tudi obsežna raziskovalna aktivnost na področju freting obrabe in iskanju boljših meril za določitev prehoda med freting obrabo in freting utrujanjem.

Ključne besede: freting, mehanika, freting režimi, freting sheme, ležaji, keramika

One of the wear forms which significantly limits the operating life of various machine components and structures is also fretting wear. Fretting is the action which causes fretting damage when two contacting bodies are subjected to a relative oscillatory tangential motion of small displacement amplitude. There exist three main forms of fretting and related damages, i.e. fretting corrosion, fretting wear and fretting fatigue. However, in recent years fretting wear and fretting fatigue are mostly used for defining the fretting damage, primarily in connection with specific fretting regimes, which describe the relation between the slip and stick zones in the contact and thus the resultant wear form. Fretting wear and fretting fatigue are present in almost all machinery and are the cause of total failure of some otherwise robust components. Survey reveals that, unlike other forms of wear, the incidence of fretting problems in machinery has not declined over the past decades, inspite of many years of recognizing and studying fretting damage. The list of potential fretting damage situations is, of course, very long but can be reduced to the three characteristic situations; bearings, couplings, and joints. The main reasons for the lack of a more stringent definition of fretting and its better prevention are the complexity of the process itself, the effects of the prevailing contact conditions, the materials in contact and the surrounding environment. Investigations are nowadays oriented on the improvement of the already established criterias for the fretting fatigue damage, its modelling, prediction and consequently prevention. On the other hand, strong research activities are also in the field of fretting wear and finding better criterias to distinguish the transition between the fretting wear and fatigue.

Key words: fretting, mechanics, fretting regime, fretting maps, bearings, ceramics

1 UVOD

V literaturi je najpogostejša definicija, ki pravi, da je "freting delovanje, ki povzroča freting poškodbo, ko sta dve telesi v kontaktu izpostavljeni medsebojnemu relativnemu izmeničnemu gibanju z majhnimi amplitudami v tangentni smeri"^{1,2}. Tako tangencialno gibanje se po splošno privzeti terminologiji imenuje tudi "zdrs". V tej formulaciji pa razlikujemo tri osnovne oblike fretinga in s tem povezane poškodbe:

- *freting korozija* je oblika freting poškodbe, kjer so nastajajoči obrabni delci kemijski reakcijski produkti elementov tribološkega kontakta³
- *freting obraba* opisuje vsakršno obrabo ali poškodbo površine, ki je posledica freting procesa^{1,3}
- *freting utrujanje* je utrujanje materialov v kontaktu zaradi cikličnih sprememb napetosti v freting razmerah².

V zadnjih letih, ko postaja razumevanje freting procesa popolnejše, se vse bolj uporabljata samo izraza freting utrujanje in freting obraba, in sicer predvsem v povezavi s posameznimi režimi⁴⁻⁷ freting procesa. Prob-

lem poimenovanja posameznih oblik fretinga izhaja predvsem iz pogosto težko določljive ločnice med njimi ter iz sočasnega obstoja več pojavnih oblik hkrati^{1,8,9}.

2 MEHANIKA FRETINGA

Za razumevanje mehanike fretinga je v tem prispevku podrobneje prikazan najpreprostejši elastični model^{10,11}, ki temelji na Hertzovi elastični teoriji¹². Zaradi jasno definirane napetostno-deformacijskega stanja je v modelu obravnavan kontakt idealno gladke krogle z ravno in idealno gladko ploskvijo. Porazdelitev normalnega tlaka po kontaktni površini $p(r)$ v obliki kroga z radijem a se lahko zapiše v odvisnosti od razdalje iz središča r v obliki:

$$p(r) = \frac{3F_N}{2\pi a^2} \sqrt{1 - \frac{r^2}{a^2}} \quad (1)$$

Pri tem je F_N sila, pravokotna na kontaktno površino. Če je kontakt obremenjen sočasno še s tangencialno silo F_T , se pri tem vnese na površino tangencialno napetost

$\tau(r)$, katere porazdelitev je definiral Mindlin¹³ z naslednjo enačbo:

$$\tau(r) = \frac{F_T}{2\pi a \sqrt{a^2 - r^2}} \quad (2)$$

Iz enačbe (2) je razvidno, da ima tangencialna napetost singularno točko na zunanjem robu kontakta ($r=a$). Iz izvajanja sledi, da nastane zunaj mejnega kroga z radijem $r=a' \leq a$ zdrs.

$$a' = a \sqrt[3]{1 - \frac{F_T}{\mu F_N}} \quad (3)$$

Pri tem je μ koeficient trenja. To pomeni, da ima pri tangencialni sili $F_T < \mu F_N$ kontaktna površina v svojem srednjem delu krog z radijem a' , katerega površina miruje in je v t.i. stik področju, ter zunanji del površine v obliki kolobarja, ki zdrsuje.

Elastična deformacija v kontaktu krogle in ploskve povzroči v tangentni smeri relativni premik δ središča krogle proti nepomični točki na ploskvi, daleč stran od kontaktne površine, v velikosti:

$$\delta = \frac{3k\mu}{2} \sqrt[3]{\frac{F_N^2}{E^2 R} \left[1 - \sqrt[3]{\left(1 - \frac{F_T}{\mu F_N} \right)^2} \right]} \quad (4)$$

k je materialna konstanta, E modul elastičnosti in R ekvivalentni radij.

Z uvajanjem tangencialne sile v kontakt prične zdrs na zunanjem robu kontaktne površine in se z večanjem tangencialne sile širi v obliki kolobarja proti središču kontaktne kroga. Ko velikost tangencialne sile doseže pogoj $F_T = \mu F_N$, se v skladu z enačbo (3) delni zdrs v kontaktu pretvori v popolni zdrs preko celotne kontaktne površine. Odgovarjajoči tangencialni premik se s tangencialno silo spreminja po enačbi (4) in je v vsakem trenutku, ko sta v kontaktu sočasno tangencialna in normalna sila, sestavljen iz elastične in zdrsne komponente.

Bolj splošen opis mehanike v freting kontaktu v primerjavi z elastičnim modelom pa sta razvila Odfalk in Vingsbo¹⁴. V elasto-plastičnem modelu sta predpostavila, da je skupni tangencialni premik sestavljen iz treh komponent, poleg elastične in zdrsne še iz pomika zaradi plastične deformacije v freting kontaktu. Do le-te lahko pride zaradi plastične deformacije v dotikih vršičkov ter plastične deformacije samega osnovnega materiala v kontaktu. Področje mirovanja se navzven nadaljuje v kolobar, imenovan kolobar plastičnega tečenja, kjer je značilna predvsem plastična deformacija vršičkov. Tudi eksperimentalni rezultati so potrdili, da je ta teorija dober približek realnemu stanju.

3 FRETING REŽIMI

Povezavo kontaktnih področij z amplitudo pomika je prvi ugotovil Vingsbo⁴⁻⁶, ko je definiral različne freting režime.

3.1 Režim mirovanja ($a' \approx a$)

Značilen je za najmanjše amplitude pomikov. V procesu se energija skorajda ne izgublja, tako da prikaže diagram $F_T = \delta$, premico, **slika 2a**. Kontaktne pogoje določa elastična deformacija osnovnega materiala ter vršičkov v področju mirovanja preko celotnega kontaktne kroga ($a' \approx a$), **slika 3a**.

Poškodbe površine so minimalne in je zanje potrebno veliko število obremenitvenih ciklov, večje od 10^6 . Zaradi tega se ta režim včasih imenuje tudi "režim majhne freting poškodbe"⁴.

3.2 Režim delnega zdrsra ($0 < a' < a$)

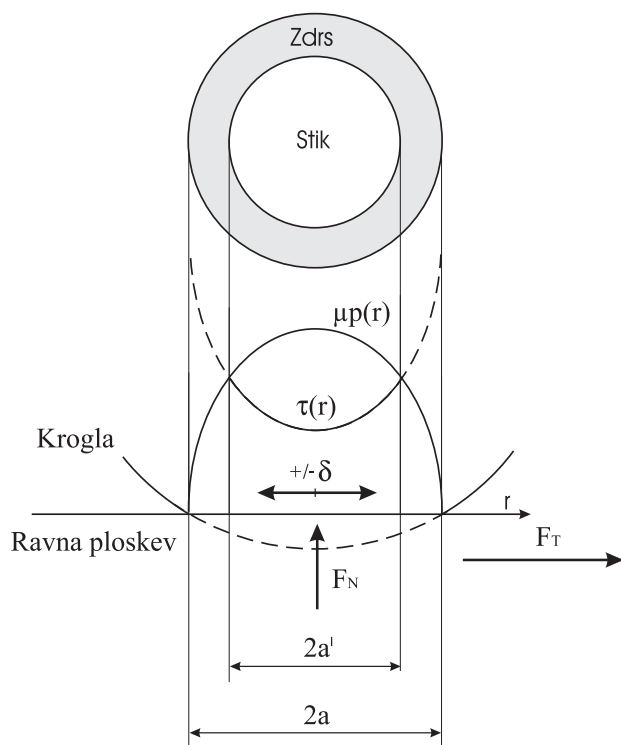
Z naraščajočo amplitudo pomika dobi plastična deformacija pomembnejšo vlogo. Pojavi se tako v osnovnem materialu znotraj mirujočega področja, kot tudi v kolobarju tečenja, ki leži med področjema mirovanja in zdrsra. Istočasno pa se v obroču zdrsra pojavi relativni zdrs med elementoma v kontaktu in nastopi striženje-lom vršičkov tudi v tem področju. Diagram $F_T - \delta$, prikazan na **sliki 2b**, se spremeni v histerezno zanko, katere površina pomeni izgubo energije trenja zaradi zdrsra in plastifikacije. V kontaktu so značilne razmere z dvema področjema, **slika 3b**.

Najbolj značilna poškodba v tem režimu je freting utrujanje, ki se pojavlja na meji med obema področjema. Za to področje so značilne utrujenostne poškodbe. Vplivi obrabe so minimalni.

3.3 Režim popolnega zdrsra ($a'=0$)

Ko amplituda pomika doseže kritično vrednost, da nastopijo razmere za $F_T = \mu F_N$, tedaj koeficient trenja pade z maksimalne vrednosti, kjer obstaja statični koeficient trenja, na nižjo vrednost, ki odgovarja kinetičnemu koeficientu trenja. Histerezna zanka se v diagramu $F_T - \delta$, deformira, kot prikazuje **slika 2c**, saj se koeficient trenja spremeni v vsaki polovici cikla enkrat, in sicer v trenutku, ko je premik večji od kritične vrednosti in nastopijo razmere za popolni zdrs.

V skladu s **sliko 3c** je celotno področje kontakta podvrženo pogojem zdrsra, kar se z vidika poškodb v kontaktu izraža z znatno obrabo. Utrujenje je zaustavljeno s prevladujočim obrabnim mehanizmom, zato se ta režim fretinga včasih imenuje tudi režim freting obrabe. V primeru prevladujoče oksidacije ga poimenujemo tudi freting korozija, čeprav se zaradi sočasnega pojavljanja več tipov obrabe raje uporablja kar freting obraba.



Slika 1: Elastični model kontakta pod vplivom normalne in tangencialne sile

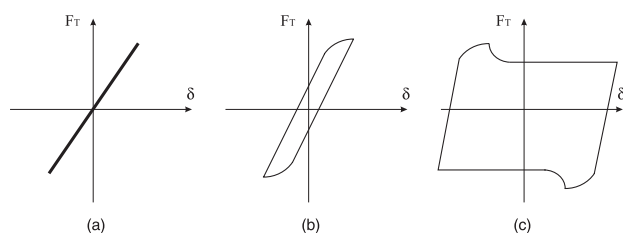
Figure 1: Elastic model for surface contact under normal load and tangential force

3.4 Režim izmeničnega drsenja

Z večanjem amplitude premika prehajajo razmere fretinga s popolnim zdrsom v izmenično drsenje. Mejni pogoji med obema režimoma so določeni z obrabnimi mehanizmi in večjo stopnjo obrabe, značilno za drsenje, ter oblikami drsne obrabe^{15,16}.

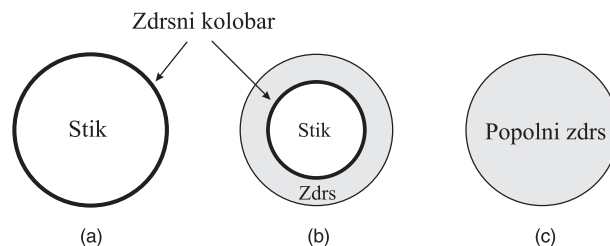
3.5 Mešani freting režim

V nedavno objavljenih odkritjih⁷ je predstavljen in predložen nov režim, imenovan mešani freting režim. Pojavlja se tako v področju delnega kot popolnega zdrsa, zato so zanj značilne poškodbe utrujanja in obrabe. Rezultati kažejo, da povzroča prav ta režim največje poškodbe v freting kontaktih. Karakterizira ga eliptična



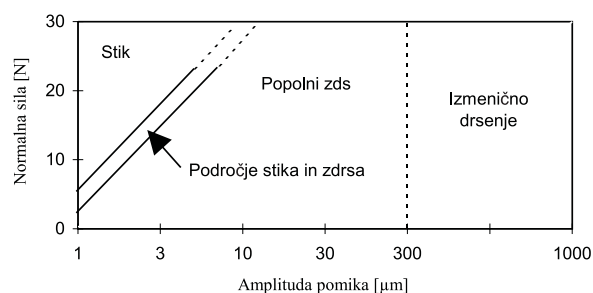
Slika 2: Diagrami $F_T - \delta$ za različne freting režime; (a) stik, (b) delni zdrs, (c) popolni zdrs

Figure 2: $F_T - \delta$ plots for different fretting regimes; (a) stick, (b) partial slip, (c) gross slip



Slika 3: Shematski prikaz kontaktnih razmer pri različnih freting režimih; (a) stik, (b) delni zdrs, (c) popolni zdrs

Figure 3: A schematic of the contact conditions in different fretting regimes; (a) stick, (b) partial slip (stick-slip), (c) gross slip



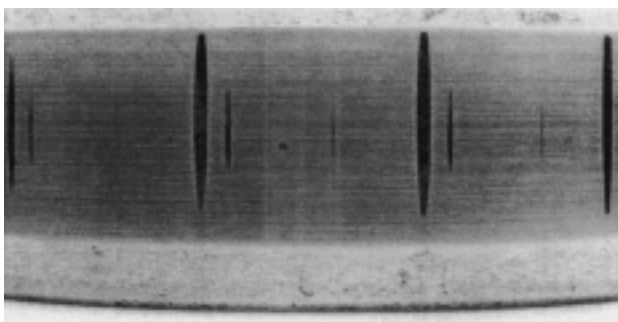
Slika 4: Fretting shema normalna sila - amplituda pomika⁴

Figure 4: Displacement amplitude - normal force fretting map⁴

oblika histerezne zanke. V mešanem režimu fretinga se lahko večkrat vzpostavijo razmere delnega ali popolnega zdrsa.

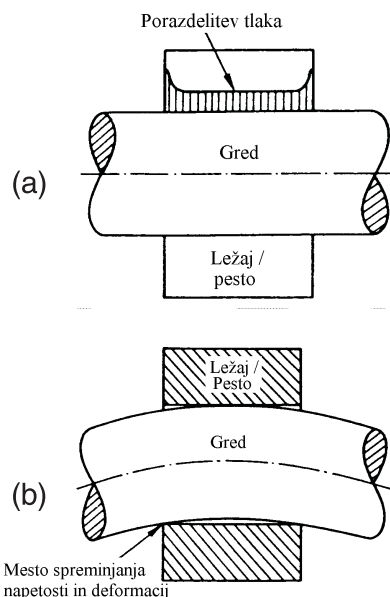
4 FRETING SHEME

V praksi je težko predvideti trajnostno dobo fretingu podvrženih različnih strojnih elementov, saj je le-ta odvisna od specifičnih delovnih in kontaktnih razmer. Vingsbo⁴ pa je pokazal, da je možno iz eksperimentalnih podatkov na osnovi dinamičnih meritev tangencialne sile ter amplitude pomikov razlikovati oziroma razpoznati različne freting režime, ki imajo vsak svojo značilno obliko poškodbe in mehanizem njenega nastanka. Tako so nastale freting sheme, to so diagrami, ki prikazujejo freting režime kot funkcijo dveh spremenljivk z mejami, kjer naj bi nastal prehod med posameznimi režimi⁴.



Slika 5: Lažna Brinellova poškodba na tečini valjčnega ležaja

Figure 5: False brinelling damage on roller bearing race



Slika 6: (a) Porazdelitev tlaka pri tesnem nasedu, (b) vpliv obremenitve

Figure 6: (a) Pressure distribution in a press fit, (b) the effect of load

Glede na številne vplivne parametre je možno sestaviti več fretting shem, npr. pomik-normalna sila, pomik-frekvenca, pomik-obraha itd. Še posebej uveljavljena je shema, ki prikazuje različne režime v odvisnosti od normalne sile in amplitude pomika, **slika 4**.

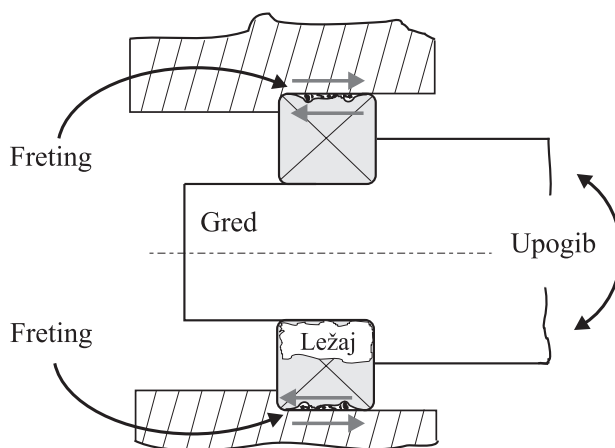
Fretting sheme so torej namenjene predvsem za interpretacijo eksperimentalnih rezultatov ter določanje okvirnih delovnih razmer, kjer naj bi se ob upoštevanju določenega tribološkega sistema lahko izognili pojavu frettinga.

5 PRIMERI POJAVLJANJA FRETING POŠKODB

V številnih publikacijah so opisani primeri pojavljanja fretting poškodb ali možnosti za njihov nastanek v praktično mehanskem spoju, ki omogoča "majhne" premike, tudi manjše od $1\mu\text{m}$. Če je vsaj ena površina v kontaktu podvržena še cikličnim obremenitvam, je verjetnost za nastanek fretting utrujanja še večja. Seznam potencialnih fretting poškodb je zato precej dolg, vendar ga lahko skrčimo na nekatere pomembnejše značilne strojne elemente, kot so sklopke, ležaji, kovice, različni spoji idr. V nadaljevanju sta podrobno opisana dva pomembnejša vzroka nastanka frettinga v primeru kotalnih ležajev.

5.1 Tečine kotalnih ležajev

Kroglični in valjni ležaji, ki so vgrajeni zgolj za omogočanje majhnih izmeničnih premikov ali pa so v mirovanju podvrženi vibracijam, lahko utrpijo precejšnje fretting poškodbe v dotikih med kotalnimi elementi in tečinami, **slika 5**. Tovrstne poškodbe ležajev so lahko



Slika 7: Fretting obraba v kontaktu med zunanjo obrobo kotalnega ležaja in ohišjem, kjer nastaja akumulacija obrabnih delcev in izguba tesnosti kontakta

Figure 7: Fretting wear at a contact between the rolling bearing outer race and housing with a debris accumulation and a loss of interference fit

težava pri transportu strojev in naprav iz kraja proizvodnje na končno prodajno mesto, npr. cestni ali železniški prevoz avtomobilov.

5.2 Nased ležaja na gredi

Zelo pogosto mesto pojavljanja fretting poškodb je površina prilega ležaja ali drugega pesta (zobnik, kolo) na gredi. Poškodba navadno izvira na robu kontakta, kjer so napetosti največje, **slika 6a**. Vzrok je lahko zunanja obremenitev, ki povzroči upogib gredi, kot je shematsko prikazano na **sliki 6b**. V dotiku se zaradi rotacije spreminja področje natezne in tlačne napetosti, ki je najbolj izrazito prav na robu, tako da na tem mestu prihaja do največjega relativnega premika med površinama, kar privede do poškodbe.

Drugi vzrok fretting poškodbe v kontaktu ležaja in gredi pa so vibracije, ki delujejo na mirujoča dela v kontaktu. Pri kotalnem ležaju, ko se vrti notranji obroč, nastane lahko fretting poškodba na zunanjem obroču, ki ima ohlapnejši ujem kot notranji in tako omogoča večje premike med površinama. Poškodba je na ležajih zelo pogosta in se izraža v nastajanju in akumulaciji obrabnih delcev, ki so pri jeklenih materialih rdečkaste barve, in v končni stopnji vodi do izgube tesnosti prilega, **slika 7**.

6 NAPOVED IN PREPREČEVANJE FRETINGA

Čeprav se fretting že zelo dolgo raziskuje, razpoznava, odkriva in išče možne rešitve za njegovo odpravo, pa je pregled tega področja pokazal, da se primeri pojavljanja frettinga v praksi ne zmanjšujejo. Definiranje frettinga v smislu povezovanja delovnih razmer s posledično možnimi poškodbami pomeni velik napredek v zadnjih letih na področju njegovega razumevanja¹⁷⁻²⁰. To pa je poleg razvoja same teorije

mehanike fretinga ter vplivov na nastanek in razvoj razpok zaradi freting utrujanja²¹⁻²⁴ sedaj najintenzivnejša smer raziskav. Vse to vodi k izpopolnjevanju že uveljavljenih meril za nastanek in razvoj freting utrujanja²⁵⁻²⁷ ter v končni fazi k modeliranju, napovedovanju in s tem tudi preprečevanju freting utrujanja.

Poleg raziskav utrujanja potekajo intenzivne raziskave tudi na področju freting obrabe ter iskanje metod za natančnejšo določitev prehoda med obema vrstama poškodb. Vendar pa je pri freting obrabi položaj precej drugačen, saj modeliranje v smislu analitičnega opisa mehanizmov in meril nastanka poškodb ter hitrosti, velikosti in drugih njihovih lastnosti ni možno. Vzrok za to je predvsem v izjemni odvisnosti obrabe od številnih specifičnih delovnih in kontaktnih razmer pa tudi nenehno uvajanje novih materialov v strojne elemente. V zadnjih letih se v uporabi uveljavlja npr. inženirska keramika. Uporaba le-te v sodobnih napravah hitro narašča, ker se njena kvaliteta in zanesljivost močno povečujeta, hkrati pa se znižuje cena. To pomeni, da lahko v prihodnje pričakujemo večjo pojavnost fretinga med keramičnimi in jeklenimi komponentami, ki so pa še vedno najpogostejše v strojnih napravah. Poznanje obrabnih mehanizmov²⁸⁻³⁶ v teh sistemih pa je ključnega pomena za odpravljanje in preprečevanje neželenih poškodb. Prav zato je eksperimentalno delo in sistematičnost raziskav na tem področju toliko pomembnejša za razpoznavanje različnih vplivov in odzivov v režimu freting obrabe. Raziskave so torej usmerjene predvsem na določene primere uporabe, kjer se problemi freting obrabe pojavljajo.

7 SKLEPI

- Freting poškodba se pojavlja kot posledica freting utrujanja in freting obrabe, ki se med seboj dopolnjujeta in velikokrat delujeta tudi sočasno.
- Pojavi freting poškodb se kljub nenehnim raziskavam še vedno povečujejo. Večina teh poškodb se zgodi na značilnih strojnih elementih, kot so ležaji, sklopke, različni spoji in protiohrabni deli.
- Na področju utrujanja se odvijajo raziskave v smeri izpopolnjevanja obstoječih meril za iniciacijo utrujenostnih razpok ter posledično modeliranju in napovedovanju utrujanja.
- Na področju freting obrabe se raziskave izvajajo za točno določeno aplikacijo z znanimi materiali ter delovnimi in okoliškimi razmerami.

8 LITERATURA

- Waterhouse R. B., *Fretting corrosion*, Pergamon, Oxford, England, (1972) 3
- Waterhouse R. B., *Fretting Fatigue*, *Int. Materials Reviews*, 37 (1992) 2, 77-97
- Glossary of Terms and Definitions in the Field of Friction, Wear, and Lubrication, OECD Publications, Paris, (1969)
- Vingsbo O., Soderberg S., *Wear*, 126 (1988) 131-147
- Vingsbo O., Fretting and contact fatigue studied with the aid of fretting maps, in: *Standardization of Fretting Fatigue Test Methods and Equipment*, ASTM STP 1159, M.H. Attia and R.B. Waterhouse, Eds., American Society for Testing and Materials, (1992) 49-59
- Vingsbo O., J. Schön, *Wear*, 162-164 (1993) 347-356
- Zhou Z. R., Vincent L., *Wear*, 181-183 (1995) 531-536
- Bill R. C., *J. of Lubr. Technol.*, ASME Trans., 105, (1983) April, 230-238
- Berthier Y., Vincent L., Godet M., *Tribology International*, 22 (1989) 4, 235-242
- Johnson K. L., *Contact Mechanics*; London, New York, Sydney, Cambridge University Press, (1985) 26 in 230
- Hills D. A., Nowell D., Sackfield A., *Mechanics of elastic contacts*, Butterworth Heinemann Ltd., (1993) strani: 111, 135, 260, 367, 456
- Hertz H., *On the Contact of Rigid Elastic Solids and on Hardness*; *Miscellaneous Papers*, MacMillan and Co., London, (1896) 163-183
- Mindlin R. D., *J. of Appl. Mech.*, 71 (1949) 259-268
- Odfalk M., Vingsbo O., *Wear*, 157 (1992) 435-444
- Nam P. Suh, "Tribophysics", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, (1986)
- Stachowiak G. W., Batchelor A. W., *Engineering Tribology*, Tribology series, 24, Elsevier, Amsterdam, (1993)
- Fouvry S., Kapsa P., Vincent L., *Wear*, 200 (1996) 186-205
- Fouvry S., P. Kapsa, L. Vincent, K. Dang Van, *Wear*, 195 (1996) 21-34
- Petiot C., Vincent L., Dang Van K., Maouche N., Foulquier J., Journet B., *Wear*, 181-183 (1995) 101-111
- Fouvry S., Ruiz F., Kapsa P., Vincent L., *Tribotest* 3-1, September (1996) 23-44
- Hills D. A., *Mechanics of fretting fatigue*, *Wear*, 175 (1994) 107-113
- Szolwinski P. M., Farris T. N., *Wear*, 198 (1996) 93-107
- Dang-Van K., Macro-micro approach in high-cycle multiaxial fatigue, in D.L. McDowell and R- Ellis (eds.), *Advances in multiaxial fatigue*, ASTM STP 1191, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, (1993) 120-130
- Fellows L. J., D. Nowell, D. A. Hills, *Wear*, 185 (1995) 235-238
- Endo K., Goto H., *Wear*, 38 (1976) 311-324
- Dang-Van K., Griveau B., Message O., *On a new multiaxial fatigue limit criterion: theory and application, biaxial and multiaxial fatigue*, in M.W. Brown and K Miller (eds.) EGF Publication 3 (1982) 479-496
- Ruiz C., Boddington P. H. B., Chen K. C., *An investigation of fatigue and fretting in a dovetail joint*, *Exp. Mech.*, 24 (1984) 3, 208-217
- Vižintin J., Kalin M., Novak S., Dražič G., Ives L. K., Peterson M. B., *Wear*, 192 (1996) 11-20
- Kalin M., Vižintin J., Novak S., *J. Mat. Sci. Eng. A*, MSA220/1-2 (1996) 191-199
- Novak S., Dražič G., Samardžija Z., Kalin M., Vižintin J., *J. Mat. Sci. Eng. A*, MSA215/1-2 (1996) 125-133
- Kalin M., Vižintin J., Novak S., *Tribologia, Finnish Journal of Tribology*, 15 (1996) 4, 42-60
- Kalin M., Vižintin J., Novak S., Dražič G., *Wear*, 210/1-2 (1997) 27-38
- Kalin M., Vižintin J., *Use of equations for wear volume determination in fretting experiments*, *In press at WEAR*, (1999)
- Kalin M., Vižintin J., *The influence of testing parameters on accuracy of equations for wear loss determination in fretting tests*, *Proc. of the 97th International Symposium on Fretting*, Chengdu, P.R. China, November 13-14, (1997) 123-155
- S. Novak, G. Dražič, M. Kalin, J. Vižintin, *Interactions in silicon nitride ceramics vs. steel contact under fretting conditions*, *in press at WEAR*, (1998)
- M. Kalin, *Doctoral thesis*, Faculty of Mechanical Engineering, University of Ljubljana, Ljubljana, (1998)