

Obraba jekla 100 Cr6 pri majhnih oscilacijah

Fretting Wear of 100 Cr6 Steel at Low Amplitude Slips

J. Vižintin, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Katedra za konstruiranje, Laboratorij za tribologijo, Ljubljana

F. Vodopivec, Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, Ljubljana

Opis poškodb, ki so nastale v odvisnosti od velikosti amplitude pri konstantni frekvenci 50 Hz. Za primerjavo smo opisali tudi poškodbe, ki smo jih opazili pri enakih amplitudah in različnih frekvencah. Opisano je mehanizem površinskih poškodb, volumska in linearna vrednost obrabe ter koeficient obrabe.

Ključne besede: torni koeficient, obraba, utrujanje površine, trenutna dotikalna temperatura

This paper presents surface damage depending upon the value of the amplitude slip at the constant frequency 50 Hz. We have compared surface damage which has been obtained at the same amplitude and at a dissimilar frequency. The present paper describes the mechanism of the surface damage, value of the volume and linear wear and wear index.

Key words: coefficient of friction, wear, surface fatigue, flash temperature

1 Uvod

Obraba pri utrujanju (fretting) je posebna oblika površinske poškodbe dotikalnih ploskev dveh trdnih teles, ki v dotiku oscilirata pri majhnih amplitudah. Tovrstne poškodbe nastajajo na več pomembnih strojnih elementih kot so kotalni ležaji, torne zveze, različni tečaji in vrtilišča ter različni drugi strojni deli. Prepoznavamo jih po enem ali več mehanizmih poškodb, ki hkrati nastajajo na dotikalnih ploskvah trdnih teles. Ti mehanizmi so lahko hrapavost dotikalnih površin, prenos materiala, nastanek in širjenje razpok ter odstranjevanje materiala oziroma obraba.

Velikost in mehanizem površinske poškodbe pri majhnih oscilacijah sta odvisna od površinskega tlaka v kontaktu, frekvence, amplitude, temperature v dotiku, lastnosti materialov v dotiku, kvalitete obdelave dotikalnih površin in okolice.

2 Osnovna spoznanja

Mejne vrednosti amplitud, pri katerih nastane poškodba dotikalne površine pri majhnih oscilacijah, še niso natančno opredeljene.

Tomlinson¹ je ugotovil, da mikro zdrsa med dvema površinama v dotiku, lahko nastane že pri amplitudi 0.002 mikrona. Zgornja meja amplitude zdrsa pa je označena s prehodom iz procesa, ki je značilen za obrabo pri utrujanju (fretting), v proces obrabe, ki nastane pri neprekinjenem drsenju dveh trdnih teles. Avtorji^{2,3} so ugotovili, da je zgornja meja amplitude zdrsa od 250 do 300 mikronov. Več avtorjev^{3,4,5,6} je ugotovilo, da je kritična amplituda zdrsa, pri kateri se pri utrujanju (fretting) obraba močno poveča, nekje med 30 in 70 mikroni. Ugotovljeno je bilo tudi, da pri amplitudi zdrsa, ki je manjša od kritične amplitude, se material ne obrablja ampak nastanejo površinske poškodbe in utrujanje materiala. Pri kritični amplitudi 25 mikronov so izmerili koeficient obrabe od 10^{-7} do 10^{-9} , kar je veliko manj kot pri drsnem trenju brez prisotnosti maziva, pri

katerem je izmerjen koeficient obrabe od 10^{-3} do 10^{-5} . V naših raziskavi smo amplitudo spreminjali od 5 do 1650 mikronov pri konstantni frekvenci. Za nekatere vrednosti amplitud smo preizkuse izvedli tudi pri povečani frekvenci, od 100 do 480 Hz. Z raziskavo smo želeli utrditi vrednosti za kritično amplitudo, določiti zgornjo mejo amplitude za nastanek obrabe pri utrujanju (fretting) in raziskati mehanizme obrabe.

3 Priprava vzorcev

Za raziskavo smo izbrali standardni par kroglica-valj. Material za kroglico in valj smo izbrali legirano krom-oglikovo jeklo 100Cr6 za kotalne ležaje. Trdota dotikalne površine vzorcev po termični obdelavi je bila od 60 do 63 HRC (860 HV). Dotikalna površina valja in kroglice je imela srednje odstopanje profila $R_a = 0.05$ in največjo višino neravnin $R_{max} = 0.44$ mikrometra, kar ustreza stopnji za kvaliteto obdelave N3 do N4. Pred vsakim preizkusom smo preizkusni par razmastili v ultrazvočni kopeli. Vlaga med preizkusom nismo posebej merili, v okolici preizkušanja pa je bila 30%. Temperatura okolice je bila 20°C.

4 Naprava za preizkušanje

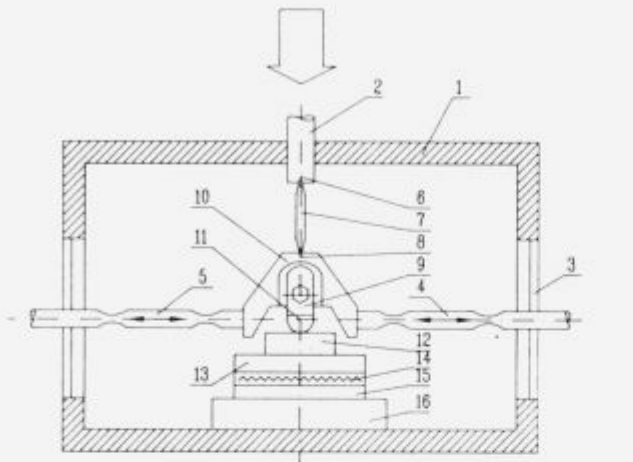
Za preizkušanje smo uporabili visoko frekvenčni stroj OPTIMOL SRV. Zgradba mehanskega dela in princip delovanja stroja sta razvidna iz slike 1.

5 Pogoji preizkušanja in analiza obrabljene dotikalne površine

Preizkuse smo opravili pri konstantni sili $F = 100$ N. Vrednosti za amplitudo in frekvenco, pri katerih smo preizkušali, nam prikazuje tabela 1. Pri konstantni frekvenci 50 Hz smo amplitudo spreminjali od 5 do 1625 mikronov. Za amplitude 10, 15, 35, 85 in 460 smo preizkuse opravili še pri spremenjenih frekvencah, tabela 1. Število ciklov 280 000 je bilo za vsak preizkus konstantno. Postopek za pripravo

Tabela 1. Vrednosti za amplitudo in frekvenco

Številka vzorca	Z ₁	Z ₂	Z ₃	Z ₄	Z ₅	Z ₆	Z ₇	Z ₈	Z ₉	Z ₁₀	Z ₁₁	Z ₁₂	Z ₁₃	Z ₁₄
Frekvenca (Hz)	50	50	50	50	50	50	50	50	50	480	400	300	200	100
Amplituda (μm)	5	15	50	75	100	150	250	500	1625	10	15	35	85	460



- 1 Preizkuševalna komora
- 2 Zunanji pritiski drog
- 3 Membrana
- 4,5 Nihajni pogonski drog
- 6 Zgornji strižni ležaj
- 7 Notranji pritiski drog
- 8 Spodnji pritiski ležaj
- 9 Vpenjalna priprava
- 10 Zgornje držalo preizkušanca (izmenljivo)
- 11 Zgornji preizkušanec (izmenljiv)
- 12 Spodnji preizkušanec (izmenljiv)
- 13 Spodnje držalo preizkušanca
- 14 Gretje
- 15 Odjemnik sile
- 16 Snemalni blok

Slika 1. Zgradba mehanskega dela SRV naprave.

Figure 1. SRV fretting test ring.

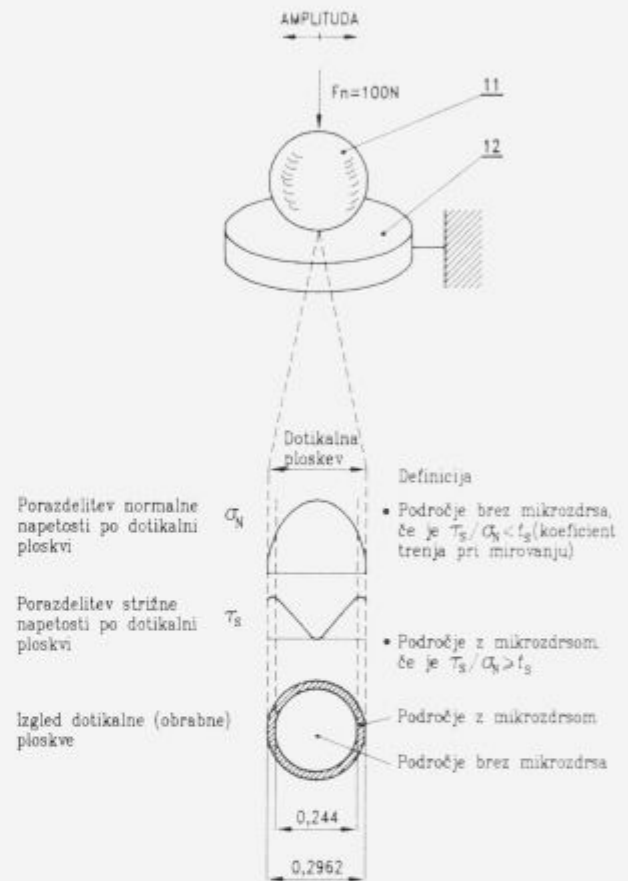
vzorcev pred in po preizkusu je bil tako časovno kot po načinu priprave enak, za vse pare preizkušancev. Temperatura, pri kateri smo preizkušali, je bila 50°C.

Pred preizkusom smo na določenem številu vzorcev izmerili trdoto, mikro trdoto in hrapavost dotikalne površine. Vse vzorce smo tudi stehali na tehtnici z natančnostjo 0.00001 g. Po preizkusu smo izmerili mikrotrdoto na obrabljeni dotikalni površini, profile kalote v smeri pravokotno na smer gibanja kroglice, velikost kalote in težo vzorcev. Obrabljene dotikalne površine smo analizirali na OM in na SEM.

6 Izračun napetosti na in pod dotikalno površino

Slika 2 nam za naš primer prikazuje porazdelitev napetosti na dotikalni površini, v obremenjenem stanju, pri mirovanju. Vrednosti za natezno in tlačno napetost, na robu in v dotikalni Hertzovi ravnini, smo izračunali za različne koeficiente trenja. Natezna napetost je največja na robu dotikalne ploskve in se z večanjem koeficienta trenja linearno spreminja. Misesova napetost je bila največja 70 mikronov pod dotikalno površino in 90 mikronov iz koordinatnega izhodišča. Do vrednosti koeficienta trenja 0.3 je konstantna nato se linearno povečuje. Podobno se spreminja tudi ortogonalna napetost, ki je bila največja 50 mikronov

pod dotikalno površino in 130 mikronov iz koordinatnega izhodišča⁶.



Slika 2. Model preizkušanja in porazdelitev napetosti za koeficient trenja pri mirovanju (μ), $\sigma_N = 2176 \text{ N/mm}^2$, $\tau_s = 1275 \text{ N/mm}^2$.

Figure 2. Model of testing, and the stress distribution in static coefficient of friction (μ), $\sigma_N = 2176 \text{ N/mm}^2$, $\tau_s = 1275 \text{ N/mm}^2$.

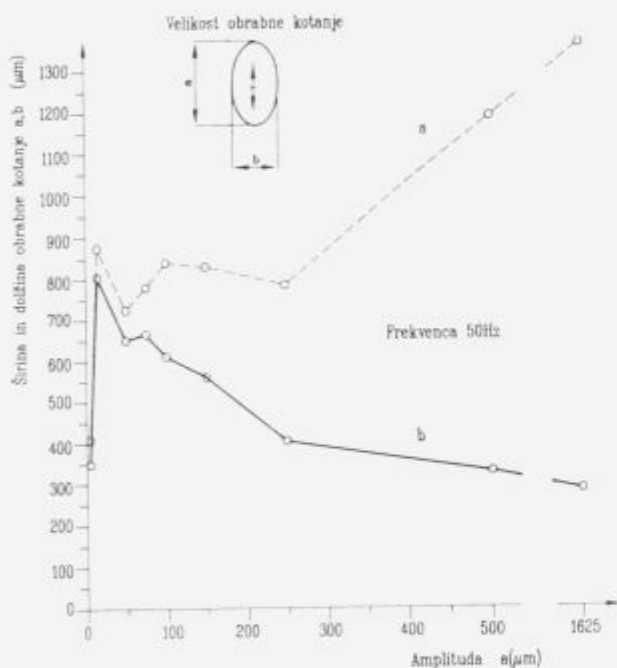
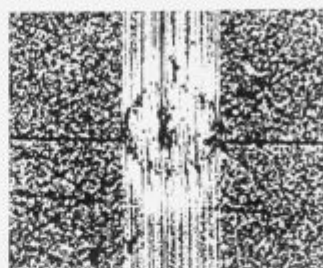
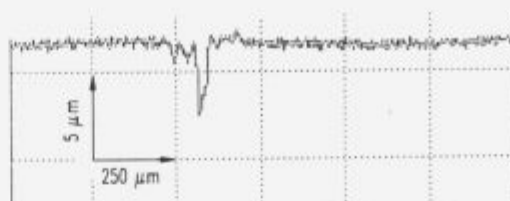
Iz podatkov za mikrotrdoto materiala, iz katerega smo izdelali vzorce, smo izračunali mejno plastično napetost za enosni nateg in strig. Izračunali smo tudi mejno strižno napetost pri kateri ne nastopi obraba, pri čemer smo predpostavili, da je izbran material odporen na adhezijsko obrabo. Vrednosti za mejne plastične napetosti in mejno strižno napetost smo izračunali za različno temperaturo popuščanja (masna temperatura vzorcev).

Za izračun napetosti smo uporabili računalniški program CONTACT⁷, ki smo ga izdelali na FS in program ACTIS, ki smo ga dobili v USA. Maksimalni Hertzov tlak je bil 2176 MPa, Hertzov radij 0.1481 mm, maksimalna deformacija na mestu maksimalnega Hertzovega tlaka pa je bila 0.0044 mm.

7 Opis rezultatov

7.1 Rezultati pri frekvenci 50 Hz

Slika 3 nam prikazuje velikosti kalot v odvisnosti od amplitude zdrsa. Pri amplitudi 5 mikronov se je kalota, v primerjavi s Hertzovo kontaktno površino (slika 2), malo povečala. Površinske poškodbe so nastale samo na tistem delu dotikalne površine, ker se je pri statični obramenitvi pojavil mikro zdrs. Utrujanje površine pa se je pojavilo tudi na srednjem delu dotikalne površine, to prikazuje slika 4. Pri amplitudi 15 mikronov se je kalota močno povečala, vendar je razmerje med osjo a in b ostalo nespremenjeno, slika 5. Topografija profila kalote, ki je prikazana na sliki 5, je zelo groba, kar dokazuje, da je bil proces nastajanja in širjenja razpok med obrabnim procesom zelo intenziven. Material se je med procesom odstranjeval, obrabljal, na dotikalni površini kalote pa smo opazili tudi oksidno plast.



Slika 3. Širina in dolžina obrabne kotalnje v odvisnosti od amplitude.
Figure 3. Diameters of the wear scar plotted as a function of amplitude.

Podoben mehanizem poškodb smo ugotovili tudi na drugih kalotah do amplitude zdrsa 250 mikronov. Profile kalot prikazuje slika 6. Os kalot a se je od amplitude 50 mikronov naprej povečevala z vrednostjo amplitude, os b pa se je zmanjševala do velikosti Hertzove dotikalne površine, ki jo je dosegla pri amplitudi 1625 mikronov. Globina kalote je bila največja pri amplitudi 15 mikronov in se je potem zmanjševala do vrednosti nič pri največji amplitudi, slika 7.

Volumska in linearna količina obrabljenega materiala je bila največja pri amplitudi 15 mikronov in se je potem zmanjševala z večanjem amplitude. Slika 8 nam prikazuje vrednosti za koeficient obrabe, katerega potek je podoben volumski obrabi.



Povečava: 100x



Povečava: 750x

Slika 4. Izgled dotikalne površine po preizkusu; $f = 50$ Hz, $a = 5 \mu\text{m}$.

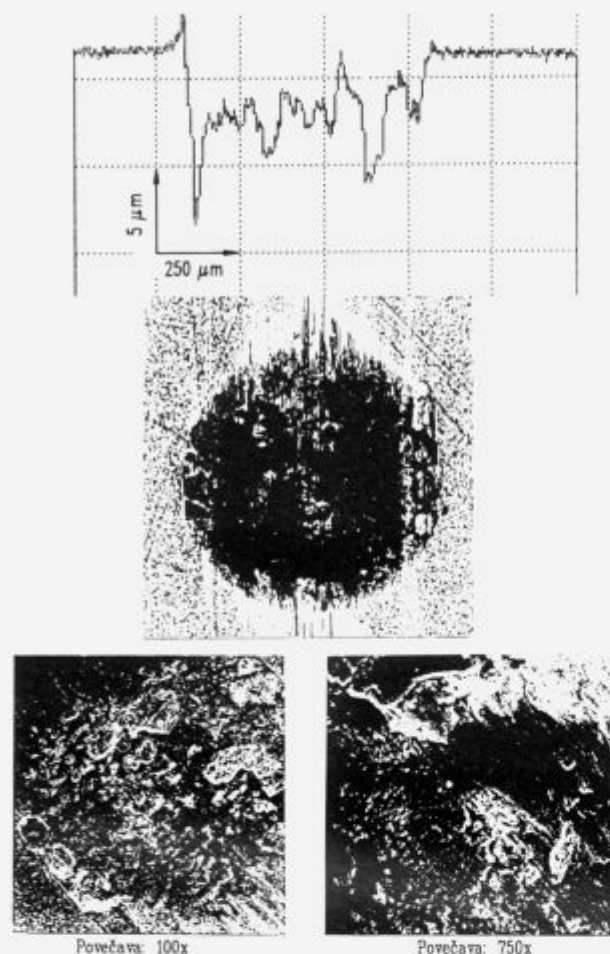
Figure 4. Microphotographs of the wear scar after the test; $f = 50$ Hz, $a = 5 \mu\text{m}$.

7.2 Rezultati pri različni frekvenci

Za amplitudo zdrsa 10, 35, 85 in 460 mikronov smo izbrali različne frekvence, da bi ugotovili, kako frekvenca vpliva na poškodbo dotikalne površine. Vsak dobljeni rezultat je treba opazovati ločeno in v primerjavi z rezultatom, ki smo ga dobili pri frekvenci 50 Hz.

Slika 9 prikazuje velikosti kalot v odvisnosti od frekvence in amplitude zdrsa. Pri amplitudi zdrsa 10 mikronov je bila topografija dotikalne površine profila kalote groba. Material se je med procesom obrabe gnetel na sredini dotikalne površine, ki je bila po velikosti približno enaka kot pri 50 Hz. Plastične deformacije so nastale na robovih dotikalne površine, kjer je bila natezna napetost največja. V sredini dotikalne površine pa se je material gnetel, zato predvidevamo, da je bila kontaktna temperatura tako visoka, da je prišlo do tečenja materiala, slika 10. Podobne rezultate smo dobili tudi pri amplitudi 15 in frekvenci 400 Hz ter amplitudi 35 mikronov in frekvenci 300 Hz. Pri amplitudi 85 in 460 mikronov ter frekvenci 200 in 100 Hz pa smo dobili profile kalot, ki so podobni profilom pri frekvenci 50 Hz, slika 6.

Globino kalot prikazuje slika 11, koeficient obrabe pa slika 12.



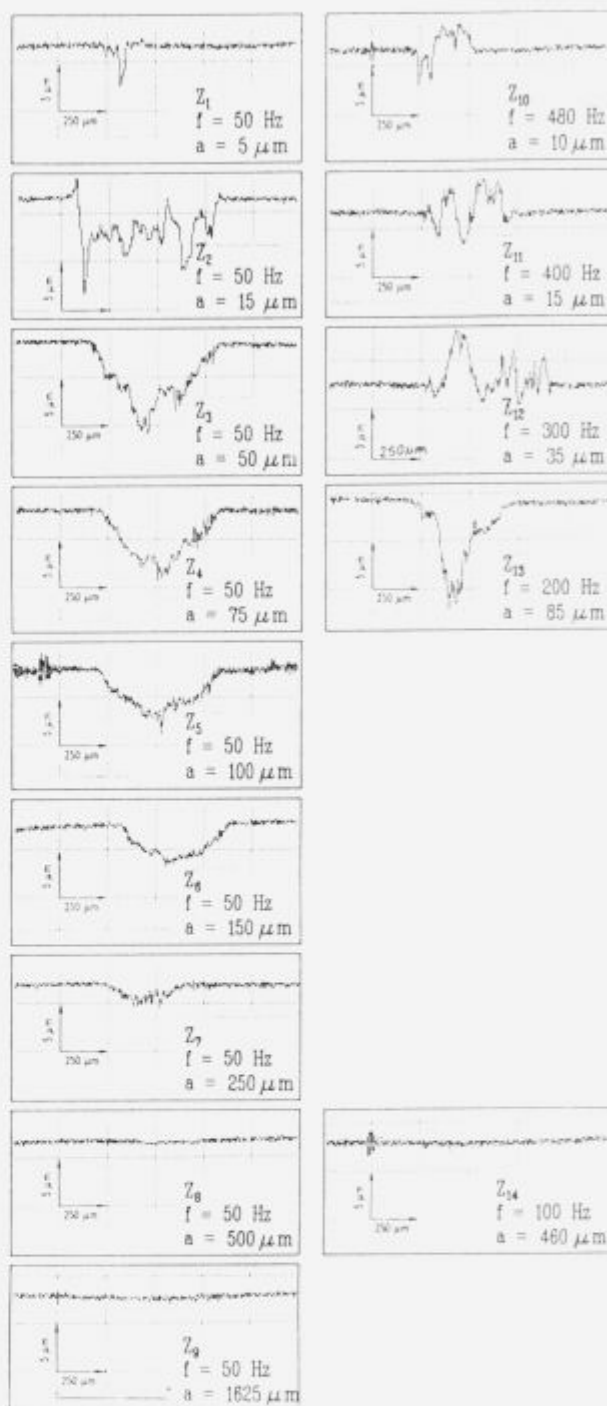
Slika 5. Izgled dotikalne površine po preizkusu; $f = 50$ Hz, $a = 15$ µm.

Figure 5. Microphotographs of the wear scar after the test; $f = 50$ Hz, $a = 15$ µm.

8 Analiza rezultatov

Pri statični obremenitvi je bila tlačna napetost na dotikalni površini taka, da je bila deformacija površine v mejah elastičnosti. Mikro zdrs je bil samo na robovih dotikalne površine, kjer se je tlačna napetost spremenila v natezno. Pri statični obremenitvi je bil koeficient trenja okrog 0.1. Pri oscilacijskem gibanju se je koeficient trenja povečal od 0.1 do 0.5, pri nekaterih primerih tudi nad to vrednostjo. Z večanjem koeficienta trenja se je natezna napetost spreminjala izmenično na robovih Hertzove površine, v smeri gibanja. Vrednost se ji je spreminjala od $0.1 \times p_0$ do velikosti Hertzovega tlaka in več, odvisno od trenutne vrednosti koeficienta trenja. Vrednost ortogonalne napetosti je bila pri koeficientu trenja od 0 do 0.4 konstantna, 914 N/mm². Ko je bil koeficient trenja večji od 0.4 pa se je linearno povečevala. S koeficientom trenja se je povečevala tudi strižna napetost na dotikalni površini.

S trenjem se je spreminjala tudi količina toplote, ki se je med procesom obrabe prevajala skozi dotikalni ploskvi v obe trdni telesi in v okolico. S številom ciklov — nihajev se je kontaktna temperatura, ki je enaka temperaturi mase in trenutne (flash) temperature, v mikro in makro dotiku stalno povečevala. S povečano temperaturo mase se je zniževala meja plastičnosti materiala v dotiku. Glede na računsko

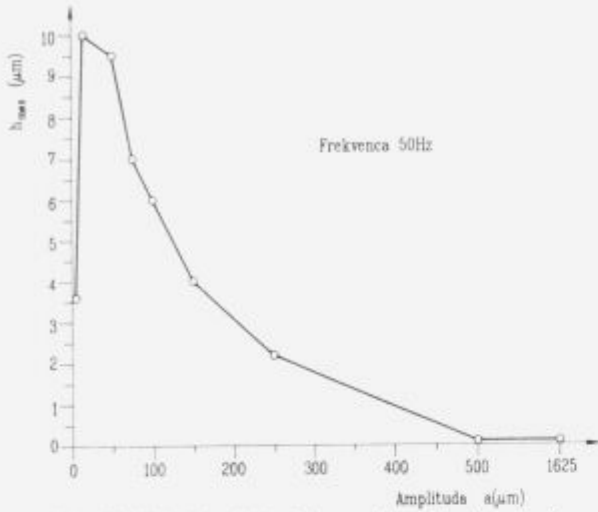


Slika 6. Profili kalot.

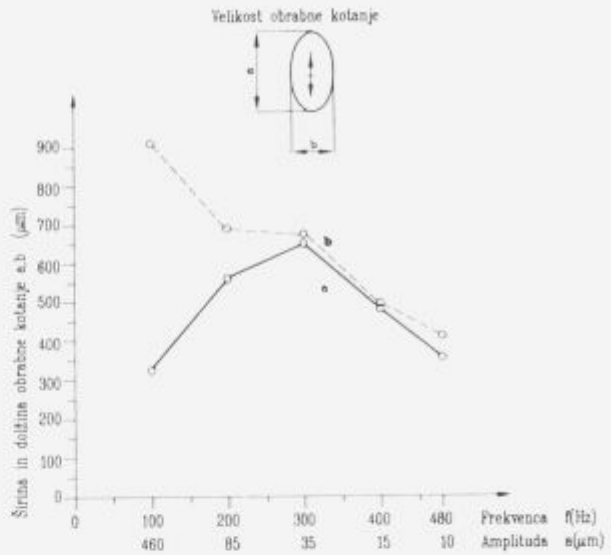
Figure 6. Profiles of wear scar.

rezultate smo ugotovili, da je v našem obremenitvenem primeru Hertzov tlak presegel dopustno mejo plastičnosti pri temperaturi mase 120°C, mejo strižne trižne napetosti pa pri temperaturi mase 400°C, kljub temu, da se je material med procesom obrabe stalno utrjeval.

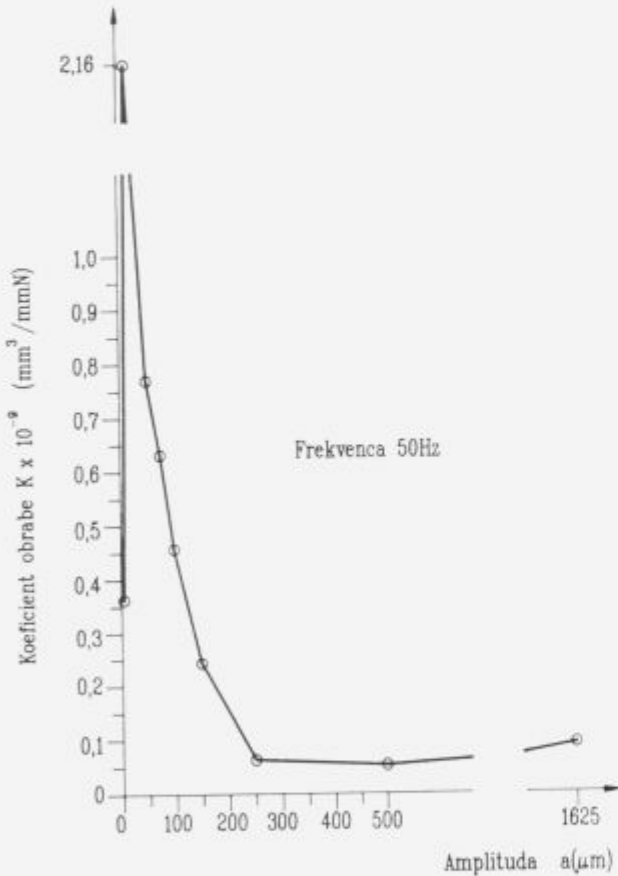
Primerjava računskih in eksperimentalnih rezultatov pa nam je pokazala, da se je pri večji frekvenci in enaki amplitudi zelo močno povečala kontaktna temperatura in s tem tudi temperatura mase. Natezna, tlačna in strižna napetost so presegle dopustno plastično napetost in mate-



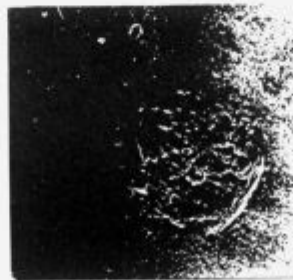
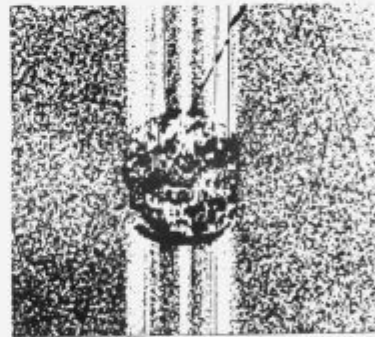
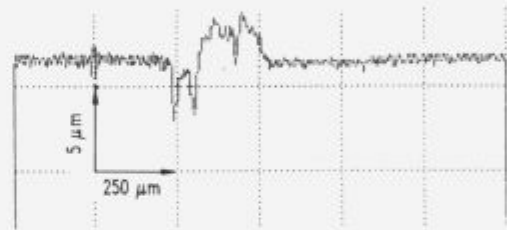
Slika 7. Največja globina kalot v odvisnosti od amplitude.
Figure 7. The greatest depth of the wear scar as a function of amplitude.



Slika 9. Širina in dolžina kalot v odvisnosti od frekvence.
Figure 9. Diameters of the wear scar plotted as a function of frequency.



Slika 8. Koefficient obrabe v odvisnosti od amplitude.
Figure 8. Wear rate as a function of amplitude.



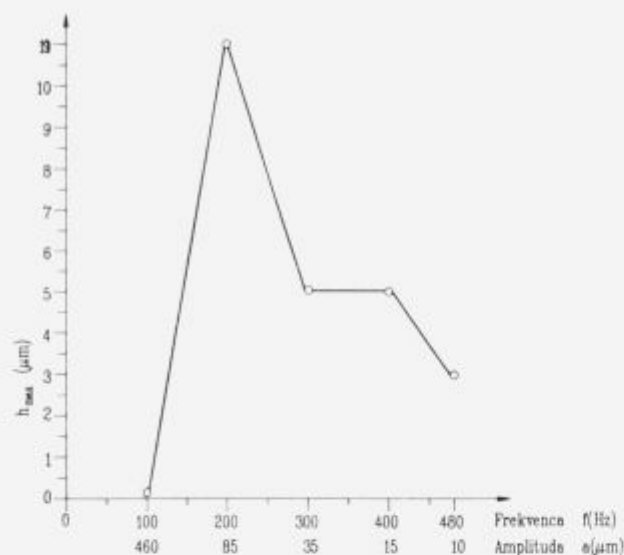
Povečava: 100x

Povečava: 750x

Slika 10. Izgled dotikalne površine po preizkusu; $f = 480$ Hz, $a = 10 \mu\text{m}$.

Figure 10. Microphotographs of the wear scar after the test; $f = 480$ Hz, $a = 10 \mu\text{m}$.

material se je plastično deformiral. Plastično deformiran material je ostal v kontaktu in se je gnetel na sredini dotikalne površine. Izgled plastično deformirane dotikalne površine prikazuje slika 10. Po našem mnenju se pri večji frekvenci, v enakem času, akumulira večja količina toplote na enako



Slika 11. Največja globina kalot v odvisnosti od frekvence.
Figure 11. The greatest depth of the wear scar as a function of frequency.

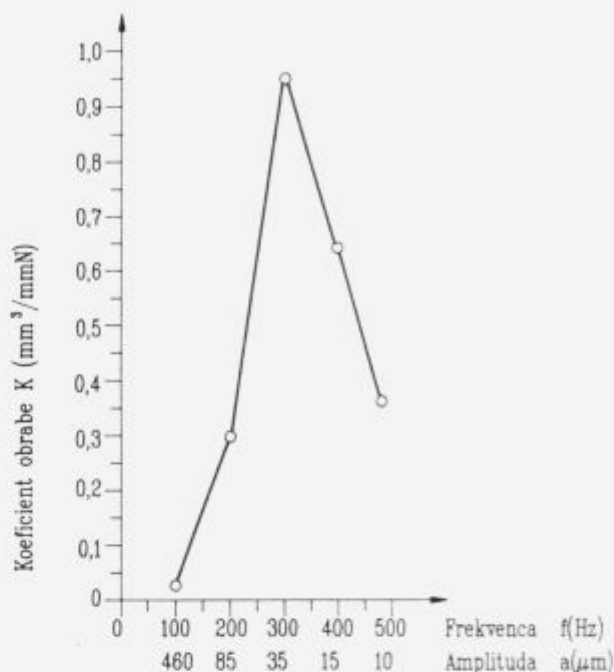
veliki ali manjši realni dotikalni površini. Ker je odvod toplote enako intenziven, enake mase in okolica, ostane v dotikalni površini večja količina toplote, ki poveča temperaturo mase. Našo domnevo potrjujejo sliki 4 in 5 in dejstvo, da takih poškodb na dotikalni površini nismo dobili na vzorcih, ki smo jih preizkušali pri povečani amplitudi in večji frekvenci, slika 6.

9 Zaključki

Na nastanek in širjenje površinskih poškodb pri majhnih oscilacijah zelo močno vplivata tako frekvenca kot tudi amplituda.

Meja obrabe pri utrujanju je odvisna od več parametrov, največje poškodbe pa smo dobili pri amplitudah od 15 do 35 mikronov in to neodvisno od velikosti frekvence. Pri amplitudi nad 250 mikronov nismo opazili poškodb dotikalne površine, ki so karakteristične za fretting.

Za nastanek in širjenje površinskih poškodb so po naši oceni zelo pomembne lastnosti materialov, ki sta v dotiku pri majhnih oscilacijskih nihanjih. Zato bi bilo potrebno nadaljnje raziskave usmeriti v študij obrabe utrujanja, pri kombinacijah različnih materialov.



Slika 12. Koeficient obrabe v odvisnosti od frekvence.
Figure 12. Wear rate as a function of frequency.

10 Literatura

- Tomlinson G.A.: "The Rusting of Steel Surfaces in Contact", Proc. Royal Society (London), 115A, pp 472-483 (1927).
- Halliday J.S. and Hirst W.: "The Fretting Corrosion of Mild Steel", Proc. Royal Society (London), 236A, pp 411-425 (1956).
- Ohmae N. and Tsukizoe T.: "The Effect of Slip Amplitude on Fretting", Wear, 27, pp 281-294 (1974).
- Waterhouse R.B.: "Fretting Corrosion", Pergamon Press, New York, (1972).
- Waterhouse R.B.: "Fretting Wear", Proc. 1981 Intl. Conf., San Francisco, California, American Society of Mechanical Engineers, pp 17-22 (1981).
- Vižintin J.: "Fretting Wear of Ceramics", Annual Report, Usa-Slo Projekt Contract No NIST JF 984, (1991).
- Vižintin J., Kosmač S.: Analiza obremenitvenega stanja po Hertzju pri enodimenzionalni zakrivljeni ploskvi, Diplomaska naloga, (1988).