

MEHANIČKI SENZOR SILE U CALOWEAR EKSPERIMENTU

Amir Kunosić, Dušan Mikičić, Željko Đurišić, *Elektrotehnički fakultet u Beogradu*

Sadržaj: Mikroabrazer sa kuglom je moguće koristiti za eksperimentalno određivanje osobina površinskih slojeva materijala debljine ($1\div 100$) μm . Jedan od pokazatelja triboloških kvaliteta je koeficijent abrazije. U eksperimentu abrazivnog habanja potrebno je poznavati kontaktnu silu pritiska F između kugle i uzorka. Teorijski način određivanja ove sile je složen i može biti nepouzdan, jer zahteva poznavanje većeg broja parametara eksperimenta. Predložena je jednostavna metoda merenja sile F uz primenu cilindrične zavojne opruge kao senzora. Pri tome je izbegnuto prethodno određivanje koeficijenta trenja klizanja i nekoliko geometrijskih parametara mikroabrazera koji se teže mere.

UVOD

Jedan od razvojnih pravaca savremene tehnologije orijentisan je ka minijaturizaciji uređaja i sistema i već daje ogromne direktne posledice u oblastima elektronike, računarstva i telekomunikacija, a posredne u svim ostalim industrijskim oblastima. U okviru tog trenda razvija se lokalizovana primena specijalizovanih materijala, kao što su tanki površinski slojevi i prevlake.

Površinska modifikacija materijala radi povećanja otpornosti na habanje, koroziju i zamor ima dugu tradiciju. U metalskoj industriji se primenjuje jedan od najstarijih postupaka – nitriranje, kojim se u površinski sloj čelika unosi azot. Nastala disperzija nitrida legirajućih elemenata veoma povoljno utiče na mehaničke i druge osobine površinskog sloja i bitno poboljšava funkcionalne osobine mašinskih delova i alata.

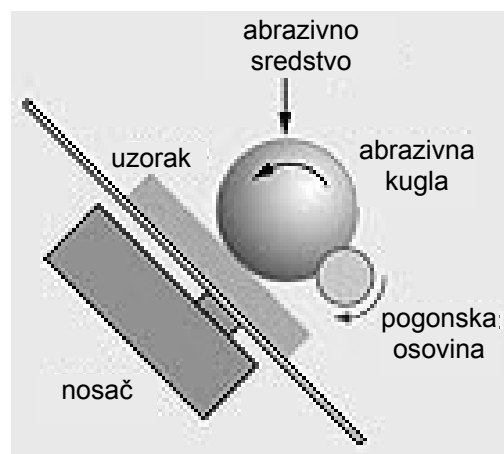
Dok se efekti nitriranja osećaju u sloju dubine do nekoliko stotina mikrometara, tokom poslednjih dvadeset godina su usavršene tehnologije nanošenja znatno tanjih, mikronskih pa i submikronskih, prevlaka na različite materijale, radi dobijanja željenih mehaničkih ili optičkih osobina. Veoma često su to slojevi na bazi titana: TiN, (Ti,Al)N, TiC i drugi, vrlo visoke tvrdoće i reflektivnosti.

Uvođenje u primenu sve tanjih površinskih slojeva, pa i višeslojnih površinskih struktura, iziskivalo je razvoj novih proizvodnih postupaka, ali i novih metoda za njihovu karakterizaciju. Savremene proizvodne tehnologije u ovoj oblasti se danas, s obzirom na najveću kontrolabilnost postupka i mogućnost dobijanja željenih osobina, zasnivaju na primeni plazme [1].

U oblasti ispitivanja triboloških osobina površinskih slojeva poslednjih godina se sve više koristi metoda mikroabrazije površine pomoću rotirajuće kugle (Calowear test). Ova metoda predstavlja jednu od naknadno uočenih mogućnosti primene tzv. Calotesta, postupka prvobitno razvijenog radi merenja debljine tankih tvrdih prevlaka nanesenih na čeličnu podlogu [2], koja se pokazala pogodnom za ispitivanje otpornosti na habanje, kako nanesenih ili modifikovanih površinskih slojeva, tako i osnovnog materijala (podloge).

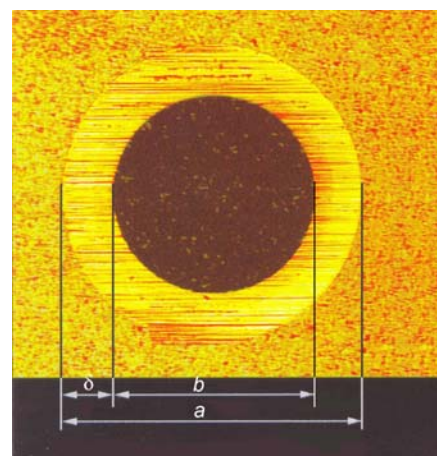
EKSPERIMENTALNA METODA

Mikroabrazer sa kuglom (sl.1) je prvobitno bio razvijen radi merenja debljine tankih površinskih prevlaka (Calotest). Rotacija profilisane osovine se, preko dve dodirne tačke, prenosi na kuglu koja je, u trećoj tački, oslonjena na površinu uzorka i haba ga pri obrtanju. Brzina i trajanje rotiranja osovine se mogu kontrolisati, kao i nagib nosača uzorka.



Sl.1 Princip rada mikroabrazera sa kuglom [2]

Ishabano udubljenje na površini uzorka ima oblik kalote prečnika a . U slučaju postojanja površinske prevlake, kugla posle određenog vremena habanja ulazi u podlogu i u kaloti se pojavljuje unutrašnji krug prečnika b , definisan donjom granicom prevlake. Ovaj slučaj prikazan je na sl.2.



Sl.2 Izgled ishabane kalote u slučaju postojanja površinske prevlake

Precizno merenje prečnika a i b ishabane kalote omogućava da se, u slučaju Calotesta, odredi debljina površinskog sloja. Uz poznavanje prečnika habajuće kugle $2R$ i

jednostavno merenje geometrijskih parametara, debljina prevlake je data sa:

$$h = \frac{a^2 - b^2}{8R} = \frac{\frac{a+b}{2} \cdot \frac{a-b}{2}}{2R} = \frac{x \cdot y}{2R} \quad (1)$$

uz uslov: $(a, b) \ll R$, (bar 5 puta), što znači da je $h \ll R$, (bar 200 puta).

Vrsta abrazivnog sredstva utiče jedino na trajanje habanja, pa se, zbog efikasnosti, najčešće koristi dijamant-pasta.

S obzirom na osobine mikroabrazera, brzo je uočena mogućnost njegove primene za ispitivanje triboloških osobina tankih prevlaka u okviru tzv. Calowear metode [3]. U ovom postupku važnu ulogu imaju vrsta abrazivnog sredstva, abrazivna zapremina V , kontaktna sila F između kugle i uzorka i put habanja S .

Jedan od pokazatelja triboloških kvaliteta površine, sa ili bez prevlake, je koeficijent abrazije $k = V/(F \cdot S)$. Veličina abrazivne zapremine (V) definisana je prečnikom kalote (a), nastale nakon pređenog puta (S) pri abrazivnom habanju, dok je F normalna komponenta sile dejstva kugle na uzorak. Uz to, brzina abrazije zavisi od normalne kontaktne sile F i od koeficijenta trenja klizanja (kugla-uzorak) koji je povezan i sa vrstom korišćenog abraziva (ili sredstva za podmazivanje). Pored mogućnosti određivanja koeficijenta abrazije, Calowear test pruža i mogućnost crtanja dijagrama abrazivnog habanja, kao promene abradirane zapremine (V) u funkciji pređenog puta (S) habanja.

Teorijski način određivanja normalne komponente kontaktne sile predložili su Rutherford i Hutchings [4]. Prema našem iskustvu ovaj postupak nije jednostavan, oslanja se na precizno merenje većeg broja dopunskih parametara eksperimenta i stoga ostavlja veće mogućnosti za pojavu greške.

U ovom radu je prikazana metoda za merenje kontaktne sile zasnovana na korišćenju cilindrične spiralne opruge kao jednostavnog senzora, primenjena u laboratoriji ETF u Beogradu. Ona omogućava merenje kako statičke kontaktne sile F_s između abrazivne kugle i uzorka, tako i dinamičke sile F tokom abrazije. Za primenu metode nije potrebno prethodno određivanje koeficijenta trenja klizanja i nekih geometrijskih parametara koji se kod mikroabrazera teže mere.

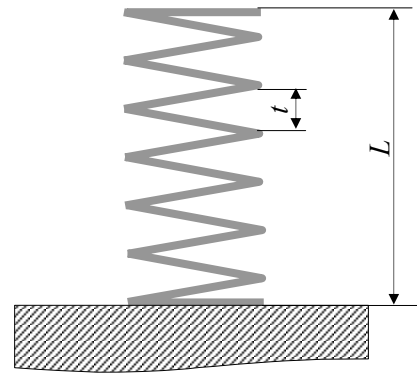
KARAKTERISTIKE SENZORA

Senzor kontaktne sile je cilindrična zavojna opruga koja pouzdano meri silu u opsegu $F = (0,2 \div 1,5)$ N. Mehanička krutost ove opruge je $c = 0,18$ N/mm. To je ustanovljeno na osnovu dva eksperimenta skraćivanja pri opterećenju:

$$\begin{aligned} 1) \quad Q_1 &= 0,65 \text{ N} \quad \rightarrow \quad f_1 = 3,6 \text{ mm} \\ 2) \quad Q_2 &= 1 \text{ N} \quad \rightarrow \quad f_2 = 5,56 \text{ mm} \end{aligned} \quad (2)$$

Opruga ne može pouzdano da meri kontaktnu silu u opsegu $F < 0,2$ N zbog smanjene preciznosti merenja deformacije opruge, a sile veće od 1,5 N se ne javljaju u primeni ove metode.

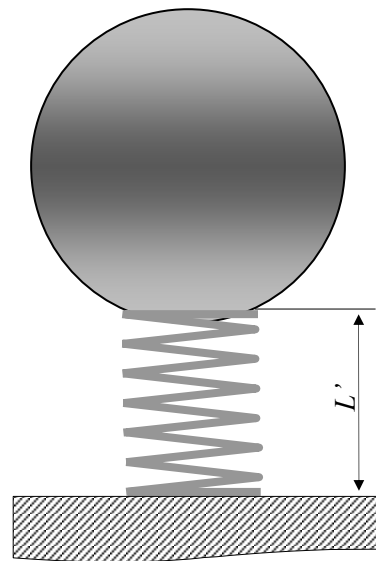
Masa opruge iznosi $m = 0,47$ g i ne utiče na preciznost merenja kontaktne sile F . Ona je napravljena od plastične mase i ima 7 zavojaka sa ravnim završetkom (sl. 3)



Sl.3 Izgled neopterećene opruge-senzora

Dužina opruge u nenapregnutom stanju je 16,5 mm. Pogled odozgo daje kružni prsten spoljnog prečnika 10 mm, a unutrašnjeg 5,7 mm.

Kada se na oprugu postavi abrazivna kugla javlja se statičko skraćenje opruge $f = L - L' = 3,5$ mm, (sl. 4).



Sl.4 Statičko skraćenje opruge

Na osnovu slika 3 i 4 može se zaključiti da je težina kugle:

$$W = c \cdot f = 0,18 \text{ N/mm} \cdot 3,5 \text{ mm} = 0,63 \text{ N}, \quad (3)$$

što je provereno dodatnim merenjem težine kugle preciznom vagon. Opruga ima prirodni zazor $t = 1,7$ mm (sl.3) i skraćuje se za 10 mm pod opterećenjem od $Q = 2$ N. Dužina blokirane opruge je 8 mm.

Nakon utvrđivanja geometrijskih i mehaničkih karakteristika same opruge-senzora, preduzeto je eksperimentalno ispitivanje njenog ponašanja pri merenju statičke i dinamičke sile na mestu mikroabrazije. Uzorak

Ø15x18 mm učvršćen je za mikroabrazer tako da je ravan abrazije nagnuta pod uglom $\varphi = 65^\circ$. Zatim je uzorak uklonjen i na njegovo mesto, u istu poziciju, postavljena opruga-senzor. Ispod opruge je postavljen kružni podmetač od tvrde gume Ø25, debljine 3,5 mm, sa velikim koeficijentom trenja klizanja ($\mu \geq 0,4$). Na drugi kraj opruge je oslonjena abrazivna kugla, koja je skratila oprugu za $f = 2$ mm i tako se našla na poziciji kao na uzorku visine 18 mm. Na osnovu navedenog skraćenja opruge zaključeno je da statička sila iznosi:

$$F_s = c \cdot f_s = 0,36 \text{ N} \quad (4)$$

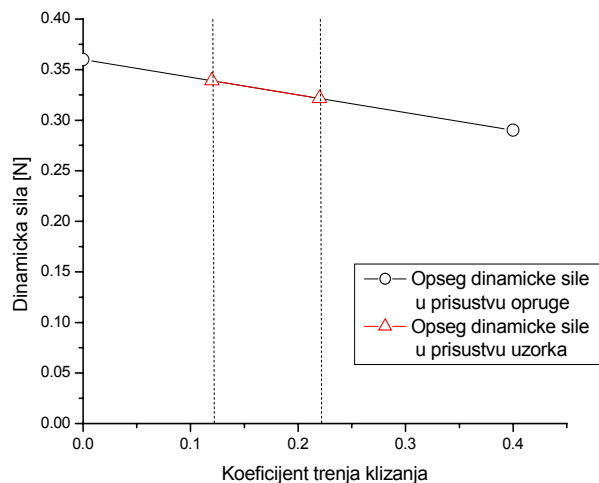
Određivanje dinamičke sile vršeno je pri rotaciji kugle (mikroabrazer uključen), u uslovima suvog trenja sa čelom opruge. Opruga je počela da osciluje sa amplitudom $A = 0,4$ mm, a dinamička sila se kretala u intervalu

$$F_{\max} = F_s = 0,36 \text{ N} \quad \text{do} \\ F_{\min} = c(f_s - A) = 0,18 \text{ N/mm} \cdot 1,6 \text{ mm} = 0,29 \text{ N} \quad (5)$$

Promena kontaktne sile pri promeni koeficijenta trenja klizanja u posmatranom opsegu prikazana je na slici 6. U našim eksperimentima koeficijent trenja klizanja je imao vrednost $\mu = 0,12$ za podmazan uzorak (nitriran i nenitriran), dok je u slučaju suve abrazije ovaj koeficijent imao vrednost 0,18 za nenitriran, a 0,22 za nitriran uzorak

Za veličinu dinamičke sile uzeta je srednja vrednost iz gornjeg opsega promene vrednosti koeficijenta trenja klizanja: $F = 0,33 \text{ N}$.

Pri merenju dužina korišćeno je kljunasto merilo, tačnosti 0,05 mm. Tačnost merenja sile iznosila je $\pm c \cdot 0,05 \text{ mm} = \pm 0,01 \text{ N}$, odnosno 2,5% od F_{\max} .



Sl.6 Zavisnost kontaktne sile od koeficijenta trenja klizanja

ZAKLJUČAK

- Određivanje koeficijenta abrazije $k = V/(F \cdot S)$ zahteva dobro poznavanje kontaktne dinamičke sile F između abrazivne kugle i uzorka. Ova sila se može eksperimentalno meriti senzorom – cilindričnom zavojnom

oprugom čija je mehanička krutost u našem eksperimentu bila $c = 0,18 \text{ N/mm}$. Tačnost merenja je iznosila $\pm 0,01 \text{ N}$, ili 2,5% uz primenu kljunastog merila tačnosti 0.05 mm.

- Statička sila iznosila je $F_s = 0,36 \text{ N}$, za $\varphi = 65^\circ$, za uzorak visine 18 mm.
- Ako bi koeficijent trenja klizanja bio veoma mali, $\mu \sim 0$, tada bi dinamička sila bila jednaka statičkoj: $F = F_s = 0,36 \text{ N}$.
- Za realne vrednosti koeficijenta trenja klizanja μ od oko 0,12 u podmazanom, do 0,22 u suvom stanju, dinamička sila F varira u intervalu od 0,34 N za podmazano do 0,32 N za suvo stanje, pa se može koristiti njena srednja vrednost $F = 0,33 \text{ N}$ (sl.6)
- Rezultati opisanih eksperimenata su u skladu sa rezultatima drugih autora [4] koji su koristili složenije metode i precizniji senzor (preciznosti $\pm 0,005 \text{ N}$).

ZAHVALNOST

Ovaj rad je podržan učešćem Ministarstva nauke i zaštite prirodne sredine Srbije u finansiranju istraživačkog projekta TR – 6305B

LITERATURA

- K.-T. Rie; Recent advances in plasma diffusion processes, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 112 (1999), pp. 56–62
- CSEM Instruments Applications Bulletin, Autumn 1996
- D.Mikičić, Ž.Đurišić, A.Kunosić, M.Zlatanović; Karakterizacija nitriranih površina Calotest i Calowear metodom, Proc. 8th International Tribology Conference, Beograd, 2003., pp.146-150
- K.L.Rutherford, I.M.Hutchings; A micro-abrasive wear test, with particular application to coated systems, *Surface and Coatings Technology* 79 (1996) 231-239

Abstract: Micro-abrasive wear test (Calowear) is used in tribological experiments for quality evaluation of superficial 1 to 100 μm thick coatings. One of significant quality indicators is the abrasion rate $k = V/(F \cdot S)$. Abrasion volume V is defined by abraded calote diameter a after the wear way S . Abrasion rate depends also on abrasive used. During abrasive wear experiments it is necessary to know the contact force F between rotating ball and sample surface. Theoretical way to contact force determination can be very complex demanding acquaintance with numerous additional experimental parameters. A more simple method is proposed in this paper for contact force measuring using cylindrical spiral spring. Using this method determining the coefficient of friction is avoided as well as not-so-easy measuring of numerous additional parameters. Proposed procedure enables contact force measurement with the $\pm 2,5\%$ error.

MECHANICAL FORCE SENSOR IN CALOWEAR EXPERIMENT

Amir Kunosić, Dušan Mikičić, Željko Đurišić