

4. VEŽBA - OSTALE MEHANIČKE OSOBINE

MODUL ELASTIČNOSTI

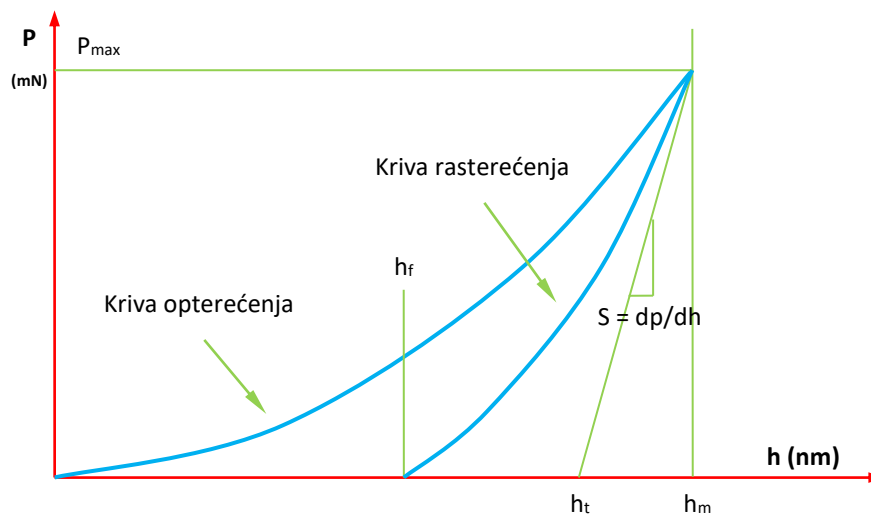
Modul elastičnosti je važna osobina prevlake, ima snažan uticaj na kontaktno polje napona, odvajanje prevlake, lom prevlake i zaostale napone u prevlaci. Postoji veći broj različitih metoda za određivanje modula elastičnosti, među koje se ubrajaju (1):

- metoda vibracione šipke (vibration reed method),
- metoda stvaranja ispupčenja (bulge test),
- metoda savijanja šipke (beam bending method),
- metoda utiskivanja (indentation test),
- metoda stvaranja elastičnih talasa u površinskom sloju (elastic wave generation method),
- metoda zatezanja (tensile test).

U nastavku se daje opis dve najčešće korišćene metode određivanja modula elastičnosti prevlaka.

Određivanje modula elastičnosti instrumentisanim utiskivanjem

Modul elastičnosti tvrdih prevlaka u najvećoj meri se određuje metodom instrumentisanog utiskivanja. Nakon utiskivanja vrši se analiza krive opterećenja rasterećenja na osnovu koje se utvrđuje vrednost modula elastičnosti, slika 4.1 . Najčešće se za analizu nastale krive koristi Oliver-Far metoda.



Slika 4.1 Kriva opterećenja-rasterećenja koja se dobija pri instrumentisanom utiskivanju

Standardne metode za analizu krive opterećenja-rasterećenja su razvijene pre svega za određivanje mehaničkih osobina neprevučanih elemenata. Rezultat utiskivanja zavisi od elastičnih i plastičnih osobina prevlake i podloge (substrata), pa se pri merenju dobijaju osobine sistema prevlaka-podloga.

U poređenju sa tvrdoćom, uticaj osobina osnove na modul elastičnosti je mnogo veći i primetan je na manjim dubinama utiskivanja (čak i za vrednosti $h/t < 0,1$). Razlog je činjenica da elastično polje ispod

utiskivača nije ograničeno na prevlaku, već se proteže kroz podlogu, pogotovo kada su u pitanju male debljine prevlaka (1).

Određivanje modula elastičnosti prema Oliver-Far metodi može se izvršiti primenom sledećeg izraza:

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1-\nu^2}{E} + \frac{1-\nu_i^2}{E_i}$$

gde su:

E_r – mereni redukovani modul elastičnosti,

$E (E_i)$ – modul elastičnosti uzorka (utiskivača),

$\nu (\nu_i)$ – Poasonov broj uzorka (utiskivača), za prevlake 0,25-0,3 a ta tvrde prevlake se uzima 0,3

Vrednost redukovanog modula elastičnosti dobija se direktno na osnovu krive opterećenja-rasterećenja, bez naknadnog merenja otiska, na osnovu sledećeg izraza:

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi} S}{2 \sqrt{A}}$$

Vrednosti kontaktne krutosti S i projekcije kontaktne površine A određuju se na potpuno identičan način kao u slučaju određivanja tvrdoće. Kontaktna krutost može se odrediti na sledeći način:

$$S = \left[\frac{dP}{dh} \right]_{h=h_m} = \alpha m (h_m - h_f)^{m-1}$$

gde su:

h_m - najveća dubina utiskivanja

h_f - dubina nastalog otiska

α i m – empirijski korekcionni faktori.

Projekcija kontaktne površine određuje se zavisno od vrste utiskivača, a odgovarajući izrazi mogu se pronaći u tabeli 4.1 .

Tabela 4.1 Određivanje projekcije kontaktne površine za različite utiskivače

Utiskivač	Projekcija kontaktne površine	Faktor ϵ
Berkovič (Berkovich)	$A = 3\sqrt{3}h_c^2 \tan^2 \alpha$	0.72 (0.75)
Vickers	$A = 4h_c^2 \tan^2 \alpha$	0.72
Knup	$A = 2h_c^2 \tan \alpha_1 \tan \alpha_2$	0.72
Ugao kocke	$A = 3\sqrt{3}h_c^2 \tan^2 \alpha$	0.72

Kontaktna dubina se određuje na osnovu sledećeg izraza:

$$h_c = h_m - \epsilon \frac{P_{max}}{S}$$

gde su:

P_{max} - najveće primenjeno opterećenje

ϵ - faktor koji zavisi od geometrije utiskivača čije su vrednosti date u tabeli 4.1

Oliver-Farovom metado za određivanje modula elastičnosti se može primeniti za tanku prevlaku na podlozi samo ako prevlaka i podloga imaju slične elastične osobine, tj. $E_f = E_s$ i $\nu_f \approx \nu_s$ gde su E_f i ν_f , E_s i

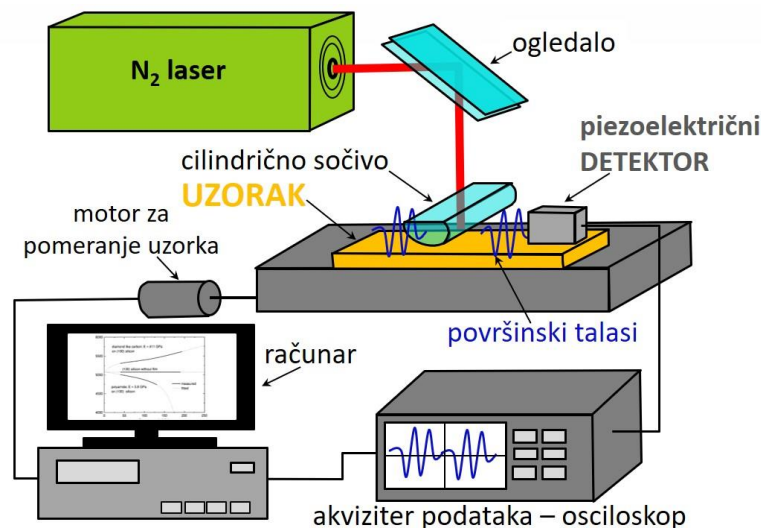
v_s modul elastičnosti i Poasonov broj materijala prevlake i modul elastičnosti i Poasonov broj materijala podloge, respektivno.

Razlika u Poasonovom broju ima mali uticaj na redukovani modul. Međutim, ako postoji velika razlika modula prevlake i podloge neće se dobiti tačna vrednost modula elastičnosti prevlake, pogotovo kada su u pitanju male debljine.

Bez obzira na navedene nedostatke Oliver-Far metoda je najčešće korišćena metoda za određivanje modula elastičnosti tvrdih prevlaka.

Određivanje modula elastičnosti primenom površinskih akustičnih talasa (surface acoustic waves)

Određivanje modula elastičnosti primenom površinskih akustičnih talasa je metoda ispitivanja bez razaranja. Princip rada metode je da se u cilju stvaranja vibracija na površini laserski snop fokusira cilindričnim sočivom na površinu ispitivanog materijala. Usled dejstva laserskog snopa stvaraju se vibracije visoke frekvencije koje se rasprostiru po površini materijala u vidu površinskih akustičnih talasa. Na površinu neposredno pored mesta dejstva laserskog snopa postavlja se piezoelektrični detektor koji meri talasne karakteristike nastalih površinskih akustičnih talasa. Šema ispitivanja modula elastičnosti primenom površinskih akustičnih talasa data je na slici 4.2 .



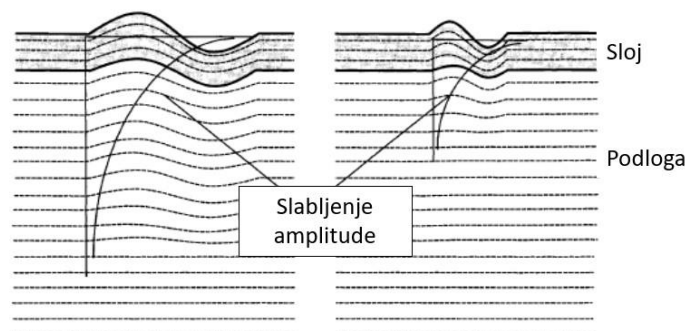
Slika 4.2 Šematski prikaz opreme za merenje površinski akustičnim talasima (2)

Niska frekvencija:

- velika talasna dužina
- duboko prodiranje
- slab efekat površinskog sloja

Visoka frekvencija:

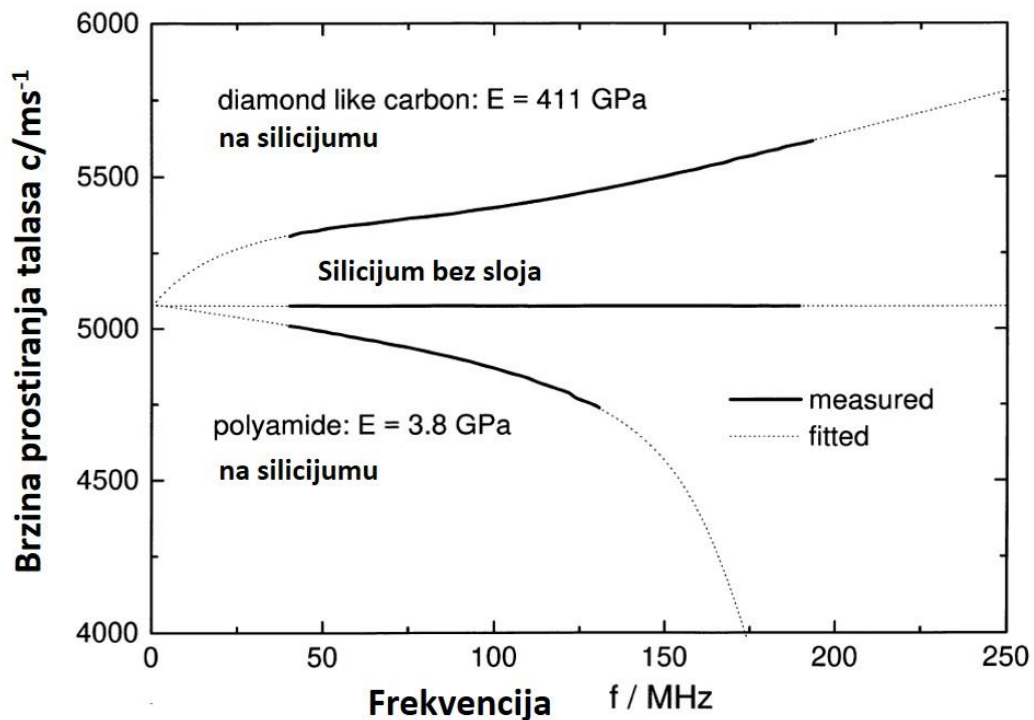
- mala talasna dužina
- plitko prodiranje
- jak efekat površinskog sloja



Slika 4.3 Osobine površinskih akustičnih talasa (2)

Amplituda nastalih talasa opada eksponencijalno po dubini materijala kao što može da se vidi sa slike 4.3 . Dubina prodiranja nastalih talasa može se proceniti na osnovu talasne dužine istih. Pošto je energija talasa koncentrisana u blizini površine nastali talasi su vrlo osetljivi na postojanje površinskih filmova, čak i kada je film mnogo tanji od dubine prodiranja talasa (3) (4).

Dubina prodiranja talasa se povećava sa smanjenjem frekvencije i obrnuto, pa se zbog toga za ispitivanje prevlaka koriste veće frekvencije. Uticaj prevlake na prostiranje talasa može se pratiti preko brzine kretanja talasa koja zavisi od modula elastičnosti prevlake (E), debljine prevlake (s), Poasonovog broja (ν) i gustine prevlake (ρ). Brzina prostiranja talasa u materijalima prevlaka zavisi i od frekvencije jer prevlaka ima veći uticaj na način prostiranja talasa za veće frekvencije. Analiza materijala ovim postupkom se izvodi tako što se izvrši niz merenja sa različitom frekvencijom, u nekom zadatom opsegu i nakon toga se iz niza merenja formiraju disperzione krive kao na slici 4.4 . Na slici su prikazane disperzione krive silicijuma (100) bez prevlake, silicijuma prevučenog DLC prevlakom (veći modul elastičnosti od osnove) i silicijuma prevučenog poliamidom (manji modul elastičnosti od osnove). Nagib i zakrivljenje disperzione krive sadrže podatke o materijalu prevlake (4).



Slika 4.4 Promena brzine prostiranja talasa sa frekvencijom (disperzija) silicijuma (100) bez prevlake, prevučenog DLC prevlakom i prevučenog sa polimernom prevlakom (4)

Pod uslovom da su ostale osobine poznate (debljina prevlake, poasonov broj i gustina), na osnovu snimljenih krivih može se odrediti modul elastičnosti (E).

ČVRSTOĆA

Instrumentisano utiskivanje krive opterećenje-rasterećenje

Određivanje čvrstoće prevlaka veoma je važan zadatak. Prevlaka mora da poseduje odgovarajuću čvrstoću zavisno od konkretne primene. Međutim, ne postoji konkretna standardizovana metoda koja omogućuje kvantitativno određivanja i poređenje čvrstoće različitih prevlaka na različitim podlogama. Problem predstavlja i činjenica da čvrstoću prevlaka nije moguće definisati samo jednim parametrom, tako da većina metoda daje ocenu o čvrstoći na osnovu većeg broja nekih drugih parametara (5).

Čvrstoća prevlaka ne može se definisati kao kod zapreminskih (konvencionalnih) materijala. Kada su u pitanju prevlake, *čvrstoća* se najčešće definiše kao otpornost ka plastičnoj deformaciji. Otpornost ka plastičnoj deformaciji može se predstaviti preko sledećeg izraza:

$$H^3/E^{*2}$$

gde su:

H – tvrdoća

E^* - efektivni modul elastičnosti koji se određuje na osnovu sledećeg izraza:

$$E^* = \frac{E}{1-\nu^2}$$

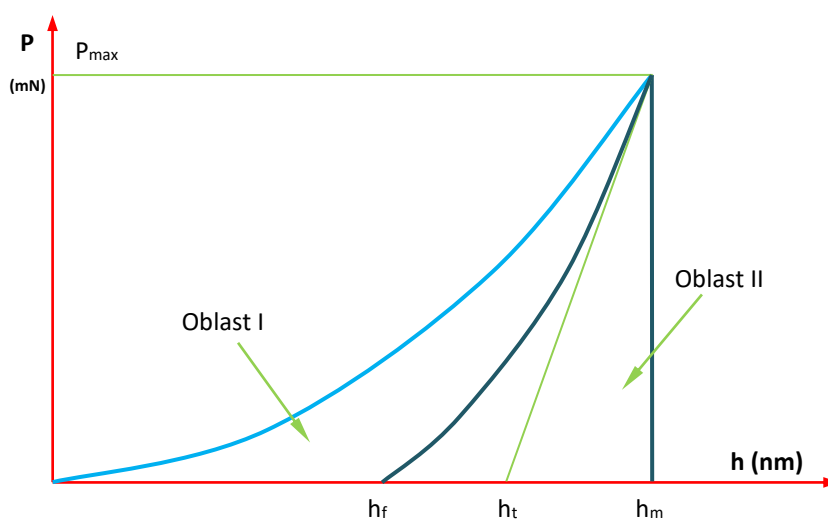
gde su:

E – modul elastičnosti

ν – Poasonov broj, koji se kod prevlaka kreće od 0,25 do 0,3 a za tvrde prevlake se najčešće uzima 0,3

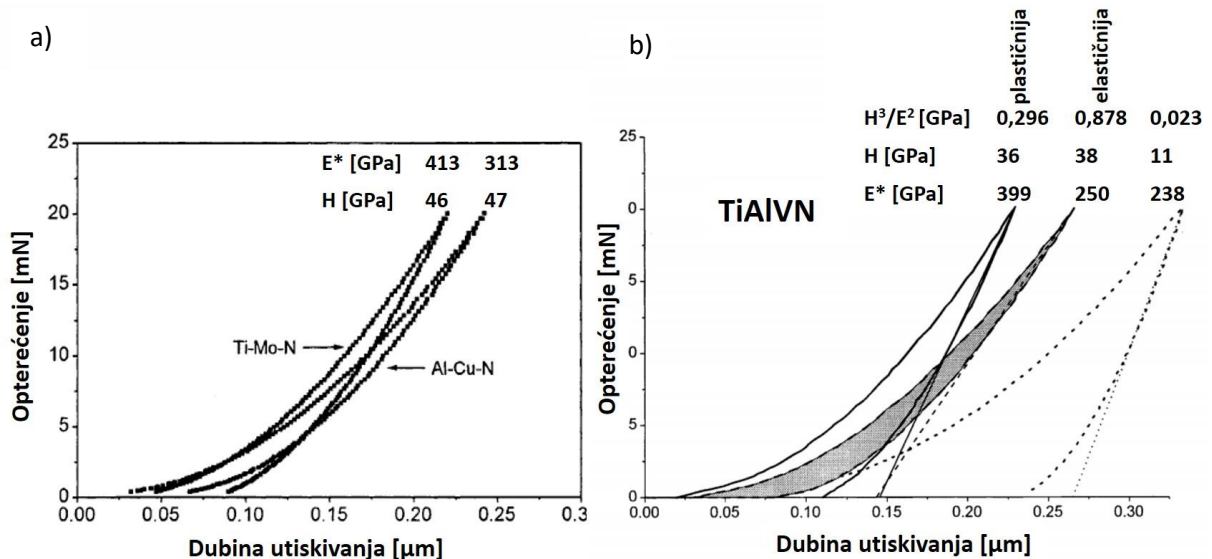
Određivanje odnosa H^3/E^{*2} vrši se instrumentisanim utiskivanjem prizme za merenje tvrdoće. U toku ispitivanja snimaju se krive opterećenje-rasterećenje (Slika 4.5) na osnovu kojih je moguće odrediti H i E, a zatim i H^3/E^{*2} .

Na prikazanom dijagramu oblast I predstavlja rad utrošen na plastičnu deformaciju uzorka, a oblast II rad elastičnog vraćanja materijala nakon rasterećenja. Odnos površina ove dve oblasti takođe daje uvid u deformaciono ponašanje prevlake.



Slika 4.5 Tipičan izgled krive opterećenje-rasterećenje koja se dobija pri merenju mehaničkih osobina

Veće vrednosti H^3/E^{*2} podrazumevaju veću otpornost ka plastičnoj deformaciji, stoga su manje vrednosti E^* poželjne jer se tada opterećenje rasprostire na široj oblasti (5). Ne postoji jednostavna veza između tvrdoće prevlake H i efektivnog modula E^* . Istraživanja pokazuju da je moguće proizvesti prevlake iste tvrdoće a različitih modula elastičnosti (Slika 4.6a), što je veoma interesantna osobina prevlaka koje se primenjuju za povećanje otpornosti na habanje. Takođe je moguće pripremiti prevlake različitih tvrdoća a istih modula elastičnosti (Slika 4.6b). Prilikom projektovanja dela na koji će se nanositi prevlaka poželjno je predvideti da modul elastičnosti prevlake bude što približniji modulu elastičnosti podloge.



Slika 4.6 a) Krive opterećenje-rasterećenje za dve prevlake iste tvrdoće i različitog efektivnog modula, b) Krive opterećenje – rasterećenje za tri Ti-Al-V-N prevlake (5)

Ovako složena zavisnost između mehaničkih osobina tvrdih prevlaka pruža mogućnost proizvodnje prevlaka koje ispoljavaju različito mehaničko ponašanje. Na primer moguće je proizvesti veoma elastične prevlake sa velikom otpornošću na plastičnu deformaciju (visok H^3/E^{*2}), ili tvrde prevlake sa velikom plastičnom deformacijom (nizak H^3/E^{*2}), slika 4.6 b (5).

U literaturi se danas sve više sreću podaci o čvrstoći prevlaka što znači da se ovaj parametar sve više prihvata kao važan parametar za klasifikaciju osobina prevlaka i samih prevlaka. Cilj određivanja mehaničkih osobina je pronalaženje osobina koje su povezane sa otpornosti ka spoljašnjem dejstvu, a zatim određivanje kriterijuma za trajnu izdržljivost. Krajnji cilj detaljnog poznavanja većeg broja mehaničkih osobina prevlaka jeste da se izbor određene prevlake može izvršiti na osnovu potrebne čvrstoće prevlake za tačno određenu namenu, kao što se to radi kod zapreminskih materijala.

ŽILAVOST

Žilavost predstavlja sposobnost materijala da absorbuje energiju tokom deformacije sve do loma. Žilavost loma je sposobnost materijala da se odupre rastu prethodno nastale pukotine. Prema tome, žilavost obuhvata energiju potrebnu za stvaranje pukotine i širenje te pukotine do loma, dok žilavost loma uzima u obzir samo energiju potrebnu za širenje pukotine do loma (6).

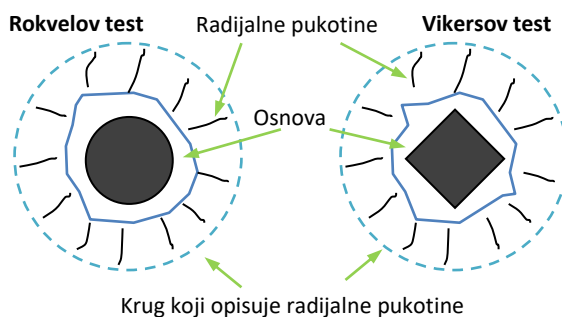
Za određivanje žilavosti prevlaka prijemnuje se više metoda koje se načelno mogu podeliti na kvalitativne i kvantitativne.

Kvalitativna analiza žilavosti

Kvalitativna analiza žilavosti je zasnovana je na analizi tragova utiskivanja. Ova analiza se vrši tako što se izvrši utiskivanje (uglavnom većim silama), sa Rokvelovim ili Vickersovim utiskivačem, u površinu sa prevlakom a nakon toga se mikroskopski vrši analiza vrste i količine oštećenja koja su nastala u tom procesu. Pri tome se vrši:

- posmatranje pukotina i odljuskanih površina oko otiska,
- analiza pukotina unutar otiska.

Šematski prikaz površine prevlake nakon utiskivanja Vickersovog i Rokvelovog utiskivača dat je na slici 4.7 . Na slici su šematski prikazana i oštećenja koja nastaju u ovom procesu a na osnovu kojih se daje ocena o žilavosti prevlake. Razmatra se površina na kojoj je prevlaka odljuskana i površina sa radijalnim pukotinama ili cirkuilarnim pukotinama. Ne daje se matematička interpretacija, već samo uporedna analiza između raznih prevlaka.

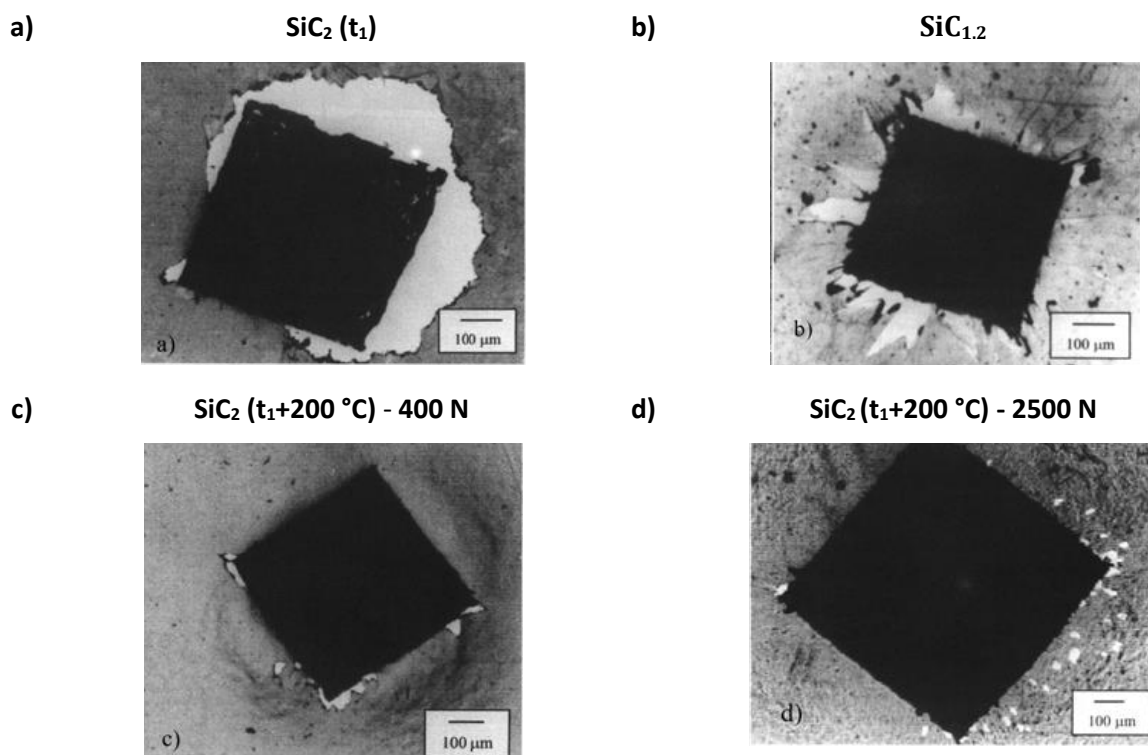


Slika 4.7 Šematski prikaz površine filma nakon utiskivanja velikim opterećenjem

Primer kvalitativne analize dat je na slici 4.8 gde su prikazani otisci za tri različite SiC_x prevlake. Analiza nastalih otisaka:

- Najmanju otpornost ka lomu pokazuje uzorak SiC_2 – jasno je vidljiva velika odljuskana zona bez radijalnih pukotina (slika 4.8);
- Uzorak $\text{SiC}_{1.2}$ ima izražene radijalne pukotine po kojima je prevlaka odljuskavana, tako da je dobijen „zvezdasti“ oblik odljuskalog dela. Uzrok odljuskavanju prevlake duž radijalnih pukotina je posledica krtosti prevlake (slici 4.8 b);
- Prevlaka SiC_2 (slika 4.8 c) dobijena na 200 °C većoj temperaturi od uzorka na slici 4.8 a pokazuje duktilno ponašanje. Iako odvajanje nastaje pri malom opterećenju, koje je jednako i za uzorak na slici 4.8 a (oko 30 N), površina odvojenog dela ostaje nepromenjena do većih opterećenja (slika 4.8 d). Pri opterećenju utiskivača od 2500 N, odljuskana površina je još

uvek relativno mala i nesimetrično je raspoređena oko otiska. Zbog plastičnog tečenja supstrata na gore, odljuskani delići su pomereni od otiska.



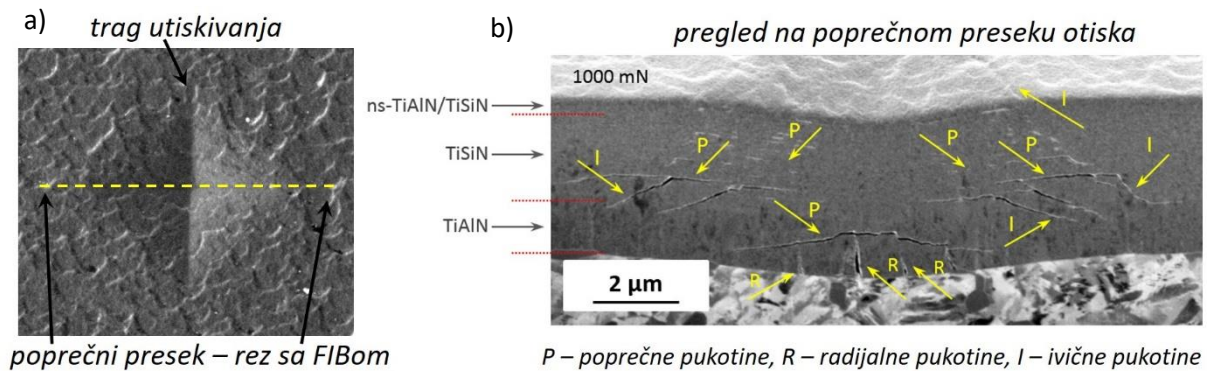
Slika 4.8 Površina SiC_x filmova, dobijenih rf - PACVD postupkom u atmosferi $\text{Si}(\text{CH}_3)_4$, nakon utiskivanja Vickersove prizme sa opterećenjem 400 N (a do c) i 2500 N (d) (7)

Poredeći ispitivanje različitim utiskivačima, može se zaključiti da se primenom Vickersovog utiskivača dobijaju bolji rezultati nego primenom Rokvelovog utiskivača. U slučaju Vickersovog utiskivača oko ivica prizme je veća koncentracija napona, te su i pukotine izraženije, što je lakše za posmatranje uočavanje razlika u ponašanju prevlaka. Za razliku od Vickersovog utiskivača gde je ugao utiskivač/uzorak konstantan, kod Rokvelovog utiskivača se ovaj ugao menja i odljuskavanje prevlake nastala na početku može prividno nestati usled pritiskanja tog odljuskano delu u podlogu.

Detaljna kvalitativna analiza žilavosti i načina loma prevlaka najbolje se može vršiti pregledom poprečnog preseka prevlaka na mestima gde je izvršeno utiskivanje sa nekom vrstom prizme. Ovakve analize se vrše različitim vrstama mikroskopskih tehnika kao što su SEM mikroskopija ili mikroskopija fokusiranim jonskim snopom (Focused ion beam – FIB). Pregledom tragova utiskivanja analiziraju se vrste pukotina i načini prostiranja pukotine kroz sloj prevlake, što se dovodi u vezu sa njenom žilavošću.

Takva analiza je prikazana na primeru troslojne prevlake na slici 4.9. Na slici 4.9 strane prikazan je trag utiskivanja snimljen sa SEM mikroskopom. FIB mikroskopijom je napravljen rez na tom tragu utiskivanja, po isprekidanoj liniji, i izvršeno je snimanje na tom poprečnom preseku slika 4.9. Na toj slici se može videti da je sa primenjenom silom utiskivanja nije došlo do značajnijeg loma gornjeg sloja prevlake (ns-TiAlN/TiSiN) iako je taj sloj plastično deformisan. U donjem TiSiN sloju prevlake javlja se veći broj poprečnih i ivičnih pukotina čijim nastankom se praktično rasterećuje prevlaka ali da pritom ne dolazi do katastrofalnog loma celog sloja prevlake. U najdonjem sloju, TiAlN sloju, prevlake se javljaju tipične poprečne i radijalne pukotine koje se nastaju uz podlogu. Ovakve pukotine najviše rasterećuju ceo sloj prevlake od opterećenja unesenog dejstvom utiskivača. Iz ovakve analize

se donosi zaključak da ova složena prevlaka ima veoma dobru žilavost i žilavost loma jer se dobro odupire i plastičnim defomacijama i prostiranju pukotina kroz ceo sloj prevlake.



poprečni presek – rez sa FIBom

Slika 4.9 Primer kvalitativne analize žilavosti nanostrukturalne troslojne prevlake (ns-TiAlN/TiSiN /TiSiN/TiAlN) izvršena sa mikroskopijom sa fokusiranim jonskim snopom

Kvantitativna analiza žilavosti

Kvantitativna analiza žilavosti se vrši tako što se izvrši utiskivanje u prevlaku sa strogo određenim vrednostima sile (uglavnom manjim), nakon toga se vrši merenje dimenzija nastalih oštećenja (pukotina) na prevlaci i preračunavanje primenom odgovarajućih matematičkih modela za određivanje žilavosti. Zahvaljujući činjenici da žilavost loma zavisi od dužine radialnih pukotina, žilavost K_{IC} može se odrediti na osnovu primenjenog opterećenja i dimenzije pukotine uz pomoć sledećeg izraza:

$$K_{IC} = \chi \left(\frac{E}{H} \right)^{1/2} \frac{P}{c^{3/2}}$$

gde su:

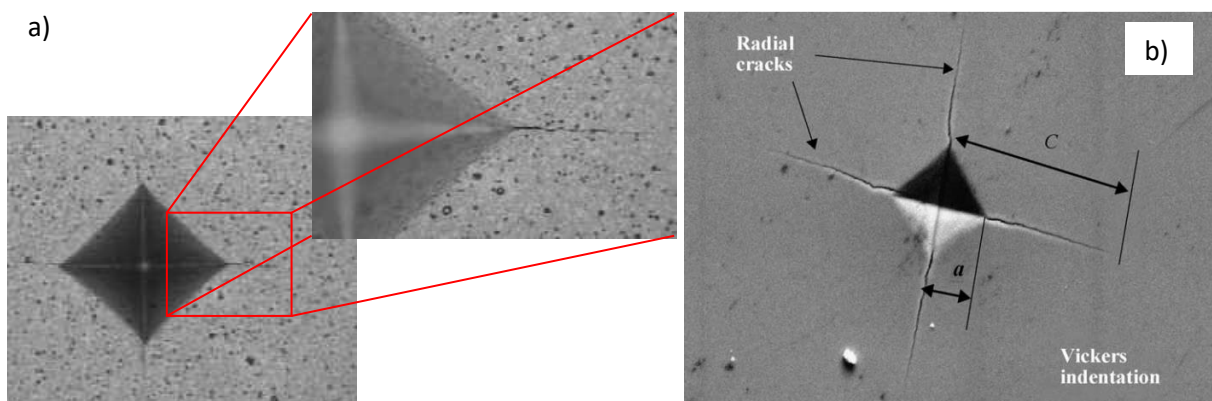
E – modul elastičnosti prevlake

H – tvrdoća prevlake

χ – konstanta koja zavisi od vrste utiskivača i za Berkovičev i Vickersov utiskivač iznosi 0.016

P – primenjeno opterećenje

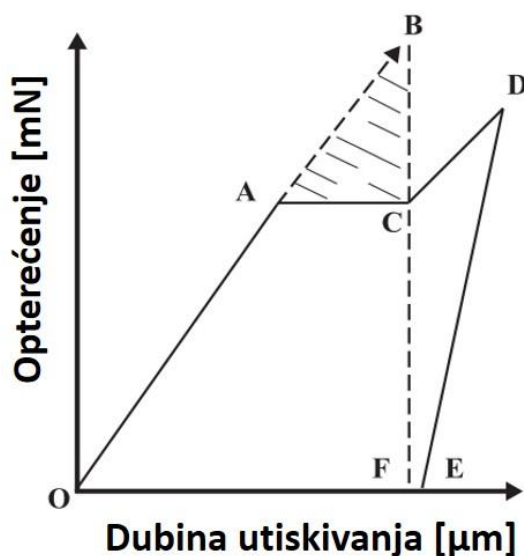
c – rastojanje od centra otiska do kraja pukotine (vidi sliku Slika 4.10)



Slika 4.10 a) Vickersov otisak (sila = 20 N) u CVD TiN prevlaci debljine 1 μm, deponovanoj na čeličnoj osnovi; b) SEM snimak Vickersovog otiska na kome je prikazan način određivanja dužine pukotine (c)

Ovaj metod razvijen je pre svega za zapreminske materijale, a može se koristiti za prevlake ukoliko su radialne pukotine dobro razvijene. Metod je najtačniji ako se primenjuje za određivanje žilavosti prevlaka debljine veće od 1 μm . Pored navedenog, ovaj metod ne može se primeniti ukoliko su pukotine ograničene na unutrašnjost otiska, što se sreće kod sistema koji se sastoje od tvrde prevlake i meke osnove.

Kao i pri merenju tvrdoće i modula elastičnosti, tako se i pri merenju žilavosti teži da dubina utiskivanja bude manja od 10% od debljine prevlake. Međutim, problem predstavlja činjenica da postoji određena veličina (prag) opterećenja ispod koje neće nastati pukotina. Za Vickersov utiskivač koji se koristi pri mikroutiskivanju to opterećenje iznosi 0,25 N ili malo više, što je dosta iznad vrednosti opterećenja koja se koriste pri nanoutiskivanju. Opterećenje pri kome nastaje pukotina može se smanjiti primenom kubnog utiskivača (ugao kocke) na vrednosti od 5 mN. Međutim, dubina prodiranja kubnog utiskivača pri tom opterećenju iznosi oko 250 nm, što prelazi vrednosti od 10% ako su u pitanju veoma tanke prevlake. U slučaju veoma tankih prevlaka, gde se zahtevaju veoma plitki otisci, što znači da su i njihove „dijagonale“ male te se za tačno određivanje nastale pukotine mora primeniti SEM mikroskopija. Zbog niza navedenih poteškoća koje postoje prilikom određivanja žilavosti osmišljena su još dva metoda za određivanje žilavosti prevlake. Za tanke prevlake može se primeniti energetski pristup prema kome se razlika energije pre i posle nastanka pukotine smatra odgovornom za lom prevlake. Na slici 4.11 šematski se prikazan dijagram instrumentisanog utiskivanja koji je tipičan za silu utiskivanja kojom utiskivač prodire dublje od 10% debljine prevlake. U ovom prosecu nastala je pukotina (kružna pukotina) koja je uticala na to da je i dijagram utiskivanja nešto drugačijeg oblika, odnosno ima stepenik.



Slika 4.11 Šematski prikaz krive opterećenje-rasterećenje pri ispitivanju žilavosti loma (6)

Energija koja se oslobađa u toku nastanka kružne pukotine može se odrediti na osnovu stepenika koji nastaje na krivoj opterećenje-rasterećenje (Slika 4.11). OACD predstavlja krivu opterećenja, a DE krivu rasterećenja. Površina ograničena sa tačkama ABC predstavlja razliku energije pre i posle nastanka prstenaste pukotine, koja se oslobađa u vidu deformacione energije za stvaranje prstenaste pukotine po dubini prevlake (Slika 4.12). Kada se izvrši merenje geometrijskih karakteristika oštećenja žilavost loma može se odrediti na sledeći način:

$$K_{IC} = \left[\frac{E \cdot U}{(1-\nu^2) A_p} \right]^{1/2}$$

gde su:

E – modul elastičnosti prevlake

ν – Poasonov broj prevlake

U – energija utrošena na lom – razlika energije koja bi se utrošila da nije nastala pukotina i energije koja je utrošena pri utiskivanju pri kome je nastala pukotina.

A_c – površina pukotine,

$$A_p = 2\pi C_R t$$

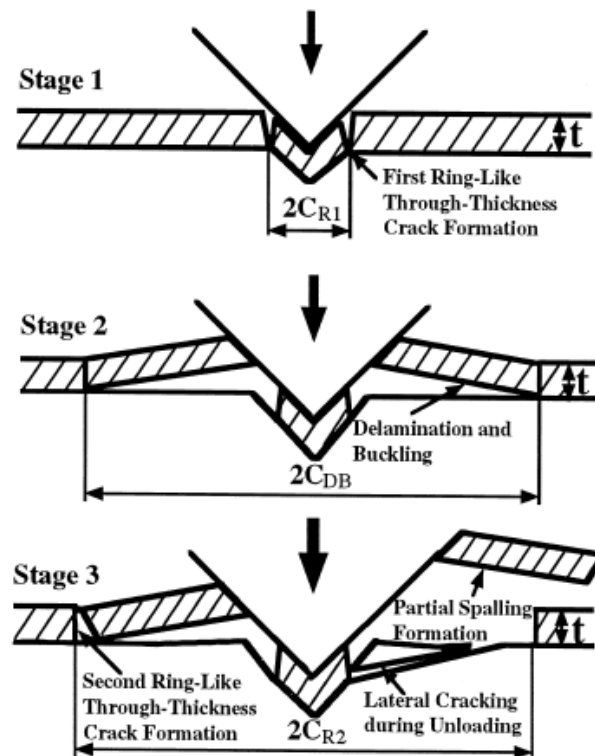
gde su:

C_R - poluprečnik pukotine

t - debljina prevlake

Pri instrumentisanom utiskivanju, u slučaju tvrdih prevlaka mogu se izdvojiti tri faze nastanka pukotina (Slika 4.12):

1. usled visokih napona u zoni kontakta nastaje prstenasta pukotina u oblasti oko utiskivača;
2. usled dejstva poprečnog pritiska dolazi do odvajanja i izvijanja prevlake oko zone kontakta na međupovršini (interface);
3. usled dejstva visokih savojnih napona na ivici izvijenog filma nastaje druga prstenasta pukotina i dolazi do otpadanja prevlake.



Slika 4.12 Šematski prikaz faza loma pri nanoutiskivanju (6)

Može se zaključiti da je i žilavost prevlake mehanička osobina čije je određivanje veoma sklono greškama, te zahteva veliku preciznost merenja i ispravan tretman takvih rezultata. Prikazani modeli su samo predlozi grupa istraživača i još nisu široko prihvaćeni.

LITERATURA

1. *Nanokarakterizacija tvrdih prevlaka*. Miletic, A. s.l. : Fakultet tehničkih nauka, 2005, Diplomski rad.
2. *Quality control of ultra-thin and super-hard coatings by laser-acoustics*. Dieter Schneider, Peter Siemroth, Thomas Schulke,... s.l. : Elsevier, 2002, Surface and Coatings Technology, T. 153, str. 252-260.
3. *Testing ultra-thin films by laser-acoustics*. D. Schneider, Th. Witke, Th. Schwarz, B. Schöoneich, B. Schultrich. 2000, Surface and Coatings Technology, T. 126, str. 136-141.
4. *A laser-acoustic method for testing and classifying hard surface layers*. D. Schneider, B. Schultrich, H.-J. Scheibe, H. Ziegele, M. Griepentrog. 1998, Thin Solid Films, T. 332, str. 157-163.
5. *Relationships between hardness, Young's modulus and elastic recovery in hard nanocomposite coatings*. J. Musil, F. Kunc, H. Zeman, H. Polakova. s.l. : Elsevier, 2002, Surface and Coatings Technology, T. 154, str. 304-313.
6. *Toughness measurement of thin films: a critical review*.
7. *Vežbe iz inženjerstva površina*. Rakita, Milan. s.l. : Laboratorija za termičku obradu, 2006.
8. *Encyclopedia of Materials Characterization*. C. Richard Brundle, Charles A. Evans Jr., Shaun Wilson. s.l. : Butterworth-Heinemann, 1992. ISBN 0-7506-9168-9.
9. s.l. : <http://www.csm-instruments.com>.
10. Mattox, Donald M. *HANDBOOK OF PHYSICAL VAPOR DEPOSITION (PVD) PROCESSING*. s.l. : Noyes Publications, 1998.
11. Bunshah, Rointan F. *Handbook of deposition technologies for films and coatings*. s.l. : NOYES PUBLICATIONS, 1994.
12. *Thickness testing*. Sajdera, Norbert. 1, Chicago, USA : Metal Finishing, January 2000, T. 98, str. 565-581.
13. *Evaluating elastic modulus and strength of hard coatings by relative method*. Y.W. Bao, Y.C. Zhou, X.X. Bu, Y. Qiu. 2007, Materials Science and Engineering A, T. 458, str. 268-274.
14. *Young's modulus of (Ti,Si)N films by surface acoustic waves and indentation techniques*. F Vaz, S Carvalho, L Rebouta, M.Z Silva, A Paúl, D Schneider. 1-2, s.l. : Thin Solid Films, 2002, T. 408.