

3. VEŽBA - ODREĐIVANJE TVRDOĆE PREVLAKA

DEFINICIJA TVRDOĆE

Da bi prevlaka otporna na habanje mogla da ispuni svoju funkciju ona mora posedovati odgovarajuću tvrdoću, koja predstavlja jednu od najvažnijih karakteristika prevlaka zaštitu alata i mašinskih elemenata. Tvrdoća nije fundamentalna osobina materijala već njena vrednost zavisi od načina merenja. Tvrdoća je jedan od najuticajnijih faktora na tribološke osobine i pokazatelj otpornosti materijala na plastičnu deformaciju (1). Tvrdoća najbolje oslikava otpornost materijala u uslovima habanja. Ova tvrdnja proističe iz činjenice da se realni kontakt između površina ostvaruje po neravninama koje podsećaju na geometriju utiskivača za određivanje tvrdoće (2).

Među faktore koji utiču na tvrdoću prevlake ubrajaju se: materijal osnove, sastav prevlake, debljina prevlake, gustina, preferirana orijentacija, veličina zrna, greške u materijalu, zaostali naponi i drugo.

MERENJE TVRDOĆE

Od davnina se tvrdoća materijala merila kao otpornost na zagrebavanje ili sečenje. Prema ovom načinu merenja ako posmatramo dva materijala tvrdi je onaj materijal koji može da zagrebe drugi. Relativna tvrdoća minerala može se odrediti prema Mosovoj (Mohs) skali u kojoj su materijali rangirani prema otpornosti da budu zagreban drugim materijalom. Ovu skalu sastavio je nemački naučnik Fridrih Mos (Friedrich Mohs) 1822. godine. Na skali se nalazi deset minerala, na vrhu je dijamant kao najtvrdi prirodni materijal. Tvrdoća nekog nepoznatog materijala može se odrediti tako što se u skali pronalazi najtvrdi materijal koji može zagrebat ispitivani materijal, i/ili najmekši materijal koji može biti zagreban ispitivanim materijalom. Na primer, ako je neki materijal zagreban sa apatitom, ali ne i sa fluoritom, tvrdoća tog materijala prema Mosovoj skali biće između 4 i 5, Tabela 3.1

Tabela 3.1 Mosova skala

Tvrdoća	Mineral	Apsolutna tvrdoća
10	Diamond (C)	1600
9	Corundum (Al_2O_3)	400
8	Topaz ($\text{Al}_2\text{SiO}_4(\text{OH}^-, \text{F}^-)_2$)	200
7	Quartz (SiO_2)	100
6	Orthoclase Feldspar	72
5	Apatite ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH}^-, \text{Cl}^-)$)	48
4	Fluorite (CaF_2)	21
3	Calcite (CaCO_3)	9
2	Gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	2
1	Talc ($\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$)	1

Ovakva skala ne može se primeniti za precizno određivanje tvrdoće modernih materijala. U ovoj vežbi spominje se samo informativno.

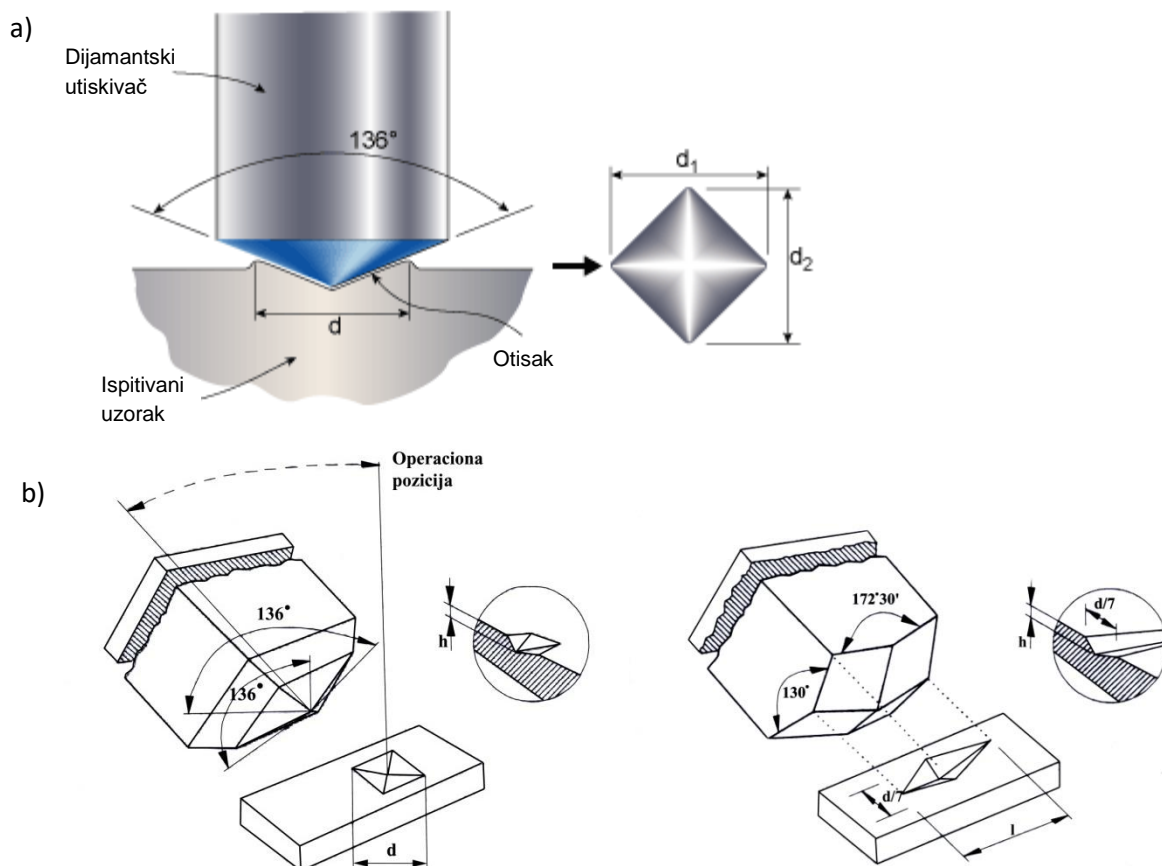
Određivanje tvrdoće prevlaka vrši se postupcima zasnovanim na utiskivanju, pri čemu se razlikuju:

1. postupci kod kojih se meri veličina otiska, tzv. konvencionalni postupci i
2. postupci kod kojih se meri dubina prodiranja prizme, tzv. instrumentisano utiskivanje.

U zavisnosti od primenjenog opterećenja postupci utiskivanja se dele na makro ($F > 10\text{N}$), mikro ($F < 10\text{N}$; $h > 200\text{nm}$) i nanoutiskivanja ($F < 300\text{mN}$, $h < 200\text{nm}$).

Konvencionalni postupci utiskivanja

Kod ovih postupaka utiskivač poznate geometrije utiskuje se u ispitivani materijal određenim opterećenjem, zadržava se 10-15 sekundi, a zatim se vrši rasterećenje. Na osnovu dimenzija nastalog otiska određuje se tvrdoća iz tablica ili se proračunava iz odgovarajućih izraza. Za merenje tvrdoće tvrdih prevlaka koriste se Vikersova (Vickers) i Knupova (Knoop) prizma, Slika 3.1. Vikersova dijamantska prizma u obliku je četverostrane piramide čije stranice zaklapaju međusobno ugao od 136° .



Slika 3.1 a) šema utiskivanja, b) geometrija Vickersovog i Knupovog utiskivača

Šema utiskivanja i geometrija Vickersove i Knupove prizme prikazani su na slici 3.1, a izrazi za određivanje tvrdoće dati su u tabeli 3.2.

Tabela 3.2 Izrazi za određivanje tvrdoće

	Po Vickersu	Po Knupu
Izraz	$H = 1.854 \frac{F}{d^2}$	$H = 14.23 \frac{F}{l^2}$
Jedinica	(kg/mm ²)	(kg/mm ²)
Legenda	F – primenjeno opterećenje d – dijagonala otiska	F – primenjeno opterećenje l – duža dijagonala otiska

Danas se više teži ka tome da se vrednosti tvrdoće izraze u jedinicama SI sistema. Izražavanjem sile u Njutnima umesto u kilogramima ($1 \text{ kg} = 9.80665 \text{ N}$) vrednosti tvrdoće dobijaju se u MPa.

Postupak ispitivanja sa Vickersovim utiskivačem pogodan je za određivanje *makro i mikrotvrdoće*. Pri određivanju mikrotvrdoće koriste se opterećenja od 30 g do 1000 g. Pošto je reč o malim opterećenjima utiskivač će ostaviti trag malih dimenzija koji se mora meriti pod mikroskopom.

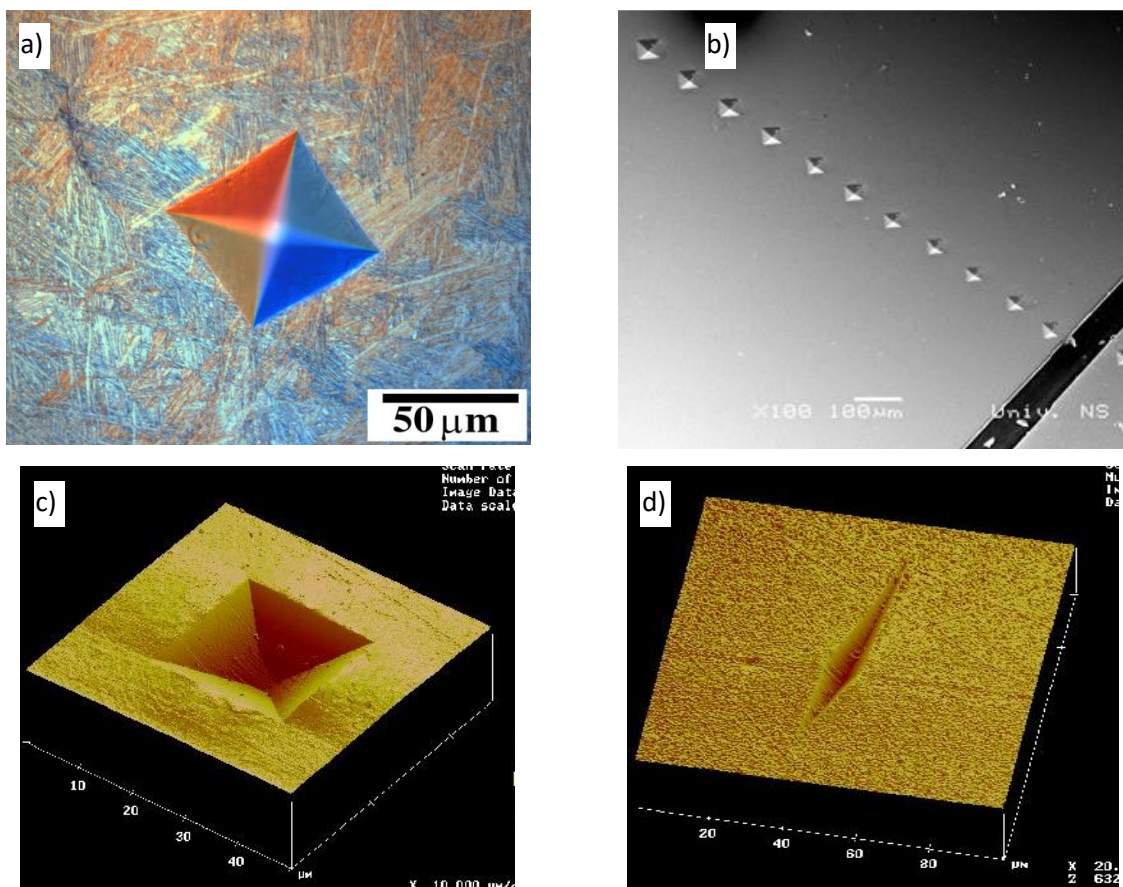
Na primer pri merenju tvrdoće TiN prevlaka za pregled tragova sa svetlosnim mikroskopom moraju se koristiti velika uvećanja (oko 1000x). Knupov utiskivač koristi se za manja opterećenje jer ostavlja otisak veće širine, pa ga je lakše meriti i pri manjim opterećenjima. Za isto opterećenje Knupov otisak je 2.8 puta duži od Vickersovog otiska.

Izmerena tvrdoća zapisuje se u obliku 1000 HV25 ili 1000 HK25, što bi u konkretnom slučaju značilo tvrdoća od 1000 Vikersa (Knupa) koja je merena sa opterećenjem od 25 kg.

Osnovne razlike između Vickersovog i Knupovog testa za istu primenjenu silu i isti ispitivani materijal:

- Vickersov utiskivač prodire duplo dublje od Knupovog,
- Vickersov test je manje osetljiv na stanje površine od Knupovog testa (kod koga uzorak mora biti poliran),
- Vickersov test je osetljiviji na greške merenja od Knupovog testa,
- Vickersov test najpogodniji je za male okrugle preseke, a Knupov za izdužene i tanke preseke,
- Knupov test pogodan je za veoma tvrde i krte materijale.

Na slici 3.2 predstavljeni su otisci koji nastaju pri merenju tvrdoće konvencionalnim postupcima, a na slici 3.3 uređaji za merenje tvrdoće.



Slika 3.2 Izgled otiska pri konvencionalnom utiskivanju a) izgled otiska Vickersovim utiskivačem posmatranog na svetlosnom mikroskopu, b) izgled Vickersovih otisaka merenih na poprečnom preseku plazma nitriranog sloja posmatranog na SEM mikroskopu, c) 3D slika Vickersovog otiska, d) 3D slika Knupovog otiska

Prilikom određivanja tvrdoće nekog materijala a tako i prevlaka uglavnom se izvedu veći broj merenja (od 3 do 12 merenja) na širem području uzorka nakon čega se odredi srednja vrednost svih merenja i odredi se rasipanje (standardna devijacija). Pri izvođenju većeg broja merenja na jednoj površini neophodno je da se merenja međusobno odalje za najmanje 3 dijagonale otiska. Razlog tome je da bi se izbegao uticaj plastičnih deformacija koje su unesene u okolinu materijala gde je prethodno izvršeno utiskivanje (merenje).

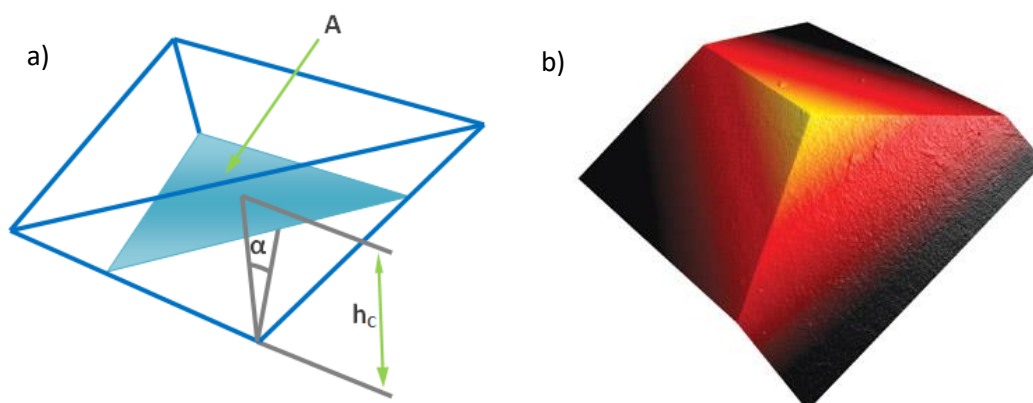


Slika 3.3 a) Analogni tester za Vickers, Brinell i Knoop sa dodatcima za mikro i makro opterećenja; b) digitalni tester sa malim opterećenjima za Vickers, Brinell i Knoop (dijapazon HV 0.1 – HV 30)

Konvencionalni postupci nisu najpogodniji za merenje tvrdoće prevlaka iz nekoliko razloga:

- relativno velike sile i dubine utiskivanja – veliki uticaj osnove na rezultat,
- merenje tvrdoće na osnovu nastalog otiska – uticaj subjektivnosti pri merenju,
- pri manjim opterećenjima otisak je suviše mali za posmatranje i merenje dijagonala.

Za određivanje tvrdoće prevlaka najpogodnije su metode kod kojih se meri pomeranje utiskivača. Tada se koristi najčešće Berkovičev (Berkovich) utiskivač čija je geometrija prikazana na slici 3.4 . Utiskivač je u obliku trostrane piramide gde svaka stranica sa osom zaklapa ugao od 65° .

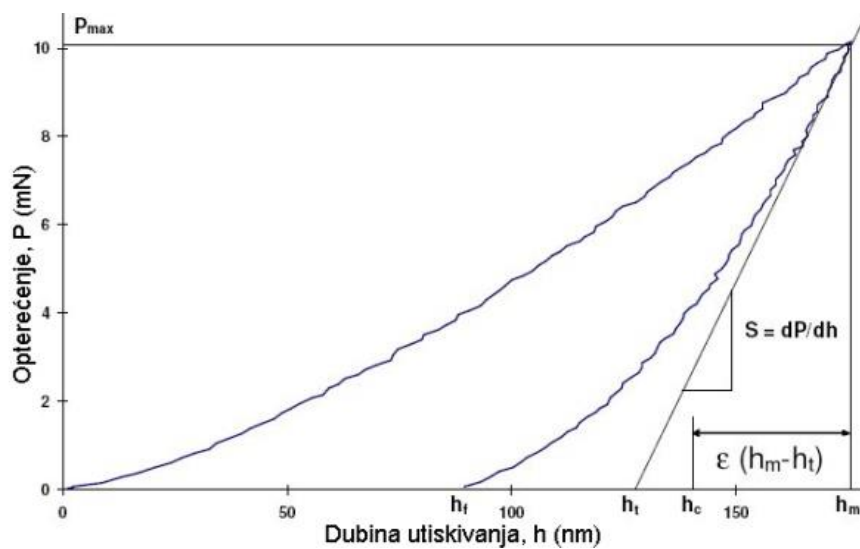


Slika 3.4 a) geometrija Berkovičevog utiskivača, b) 3D izgled Berkovičevog utiskivača

Iako ne ostavlja najmanji otisak ovaj utiskivač koristi se za najmanja opterećenja za tzv. nano i piko utiskivanja. Pošto se kod ovih utiskivanja ne meri otisak (već pomeranje utiskivača) njegova veličina nije bitna, a Berkovičev utiskivač primenjuje se zbog najveće preciznosti geometrije vrha.

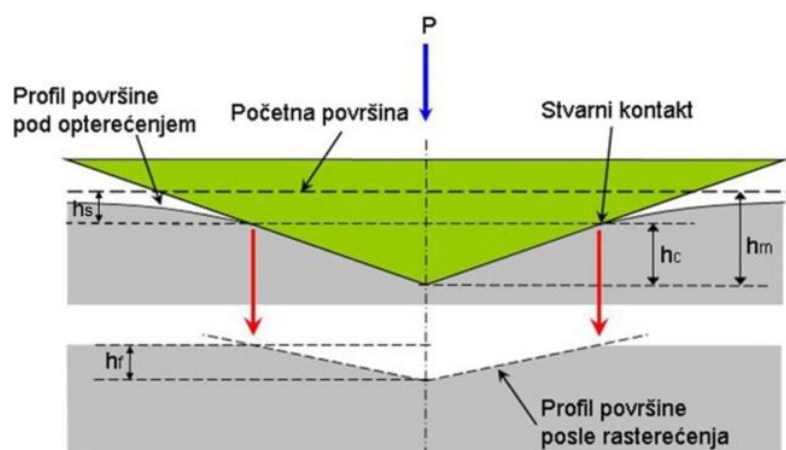
Instrumentisano utiskivanje - Određivanje nano tvrdoće

Debljine prevlaka koje se danas najviše koriste za povećanje otpornosti na habanje alata i mašinskih elemenata su veoma male (do 10 μm). Stoga je za tačno određivanje tvrdoće prevlaka i dozvoljena dubina prodiranja utiskivača veoma mala. Male dubine prodiranja mogu se postići primenom instrumentisanog nanoutiskivanja ($h < 200 \text{ nm}$). Kod ovog postupaka vrh utiskivača utiskuje se promenljivom silom u prevlaku. Sila se prvo povećava do neke maksimalne vrednosti P_{max} , a zatim se vrši rasterećenje do delimične ili potpune relaksacije materijala. U toku utiskivanja meri se vrednost prodiranja pri primenjenoj sili i na taj način se dobija kriva opterećenja-rasterećenja prikazana na slici 3.5.



Slika 3.5 Primer krive opterećenja-rasterećenja

Dubine ostvarene u određenim momentima utiskivanja su: h_m -najveća dubina, h_c -dubina kontakta i h_f -dubina krajnjeg otiska, a šematski su prikazane na slici 3.6. Slika 3.6 predstavlja poprečni presek prilikom utiskivanja u momentu ostvarivanja najvećeg opterećenja i poprečni presek otiska koji nastaje nakon rasterećenja.



Slika 3.6 Šematski prikaz profila površine pri utiskivanju

Kod postupka nanoutiskivanja se ne meri otisak kao kod konvencionalnih postupaka, već se tvrdoća određuje direktno na osnovu krive opterećenja-rasterećenja. Najčešće korišćena metoda analize ove krive poznata je pod nazivom Oliver-Farr (Pharr) metoda. Prema ovoj metodi tvrdoća (H) se određuje na osnovu sledećeg izraza:

$$H = \frac{P_{max}}{A}$$

gde su:

P_{max} – najveća sila,

A – projekcija kontaktne površine. U tabeli 3.3 dati su izrazi za određivanje projekcije kontaktne površine za različite vrste utiskivača.

Tabela 3.3 Određivanje projekcije kontaktne površine za različite utiskivače

Utiskivač	Projekcija kontaktne površine	Faktor ϵ
Lopta	$A \approx 2\pi R h_c$	0.75
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
Konus	$A = \pi h_c^2 \tan^2 \alpha$	0.72

Dati izrazi podrazumevaju savršenu geometriju utiskivača, međutim svaki utiskivač poseduje zaobljenje vrha koje se uzima u obzir proširenjem ovih izraza. U proširenim izrazima javlja se veliki broj konstanti koje opisuju odstupanje od savršene geometrije, čije određivanje je relativno kompleksno. Primenom izraza iz tabele tabeli 3.3 dobijaju se zadovoljavajući rezultati, pa se oni najčešće koriste. Ovi izrazi pokazuju da se projekcija kontaktne površine određuje direktno na osnovu dubine kontakta h_c . Dubina kontakta zavisi od kontaktne krutosti S , najvećeg opterećenja P_{max} , najveće dubine prodiranja h_m i geometrije utiskivača izražene preko faktora ϵ . Dubina kontakta se određuje direktno na osnovu krive opterećenja-rasterećenja, bez merenja otiska. Izraz za određivanje kontaktne dubine glasi:

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

Vrednosti veličina h_m i P_{max} određene su odmah po završetku utiskivanja, vrednost faktora ϵ zavisi od oblika utiskivača i data je u tabeli 3.3, vrednost kontaktne krutosti određena je početnim nagibom krive rasterećenja, dobija se diferenciranjem jednačine krive rasterećenja $P = \alpha(h-h_f)^m$ pri najvećem opterećenju:

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

gde su α i m – empirijski korekcionni faktori.

Iako relativno složen postupak određivanja tvrdoće metodom Oliver-Far, ona se najčešće koristi za određivanje tvrdoće pri ispitivanju instrumentisanim utiskivanjem. Danas se mogu naći pojednostavljeni postupci određivanja tvrdoće. Jedan od njih sličan je prethodno opisanom, a razlika je način određivanja dubine h_c , koji ne zahteva proračunavanje kontaktne krutosti i korekcionnih faktora. Prema tom „neimenovanom“ postupku dubina prodiranja određuje se:

$$h_c = h_m - h_s$$

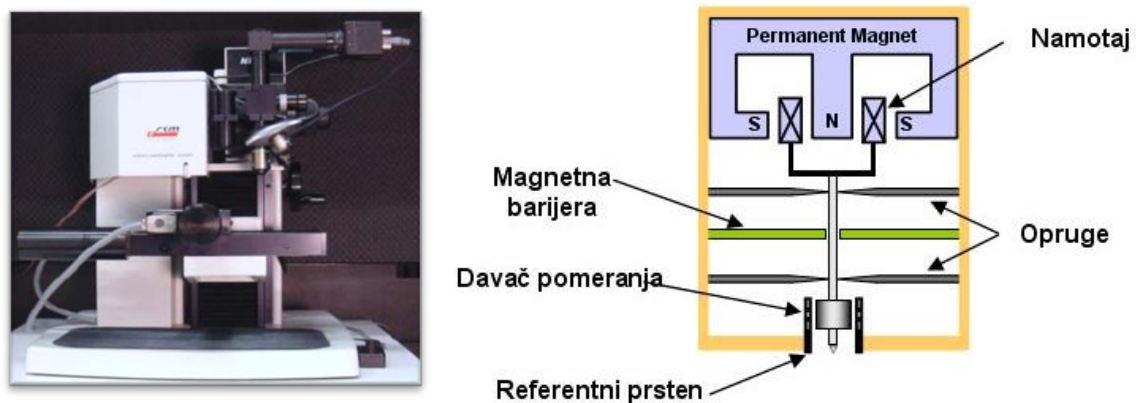
gde je h_s – veličina elastičnog pomeranja površine koja se određuje pomoću izraza:

$$h_s = \eta \cdot (h_m - h_f)$$

gde je η – geometrijska konstanta, koja ima vrednost 0.58 za Berkovičev utiskivač.

Ovim postupkom rezultati se dobijaju brzo i jednostavno, dubina kontakta h_c se određuje krajnje jednostavno, na osnovu izmerene najveće dubine i dubine otiska nakon rasterećenja.

Uređaji za određivanje tvrdoće instrumentisanim utiskivanjem zovu se nanoutiskivači ili nanoindenteri (Nano Hardness Tester-i). Na slici 3.7 a prikazan je jedan savremeni nanoutiskivač.



Slika 3.7 a) izgled uređaja za određivanje tvrdoće instrumentisanim utiskivanjem firme CSM, b) šema sistema za ostvarivanje sile i vođenje utiskivača u najsavremenijim uređajima za instrumentisano utiskivanje

Ovi uređaji omogućuju merenje tvrdoće pri dubinama prodiranja od svega nekoliko nanometara a pored tvrdoće mogu se koristiti za određivanje modula elastičnosti, žilavosti loma, otpornosti na zamor i puzanje.

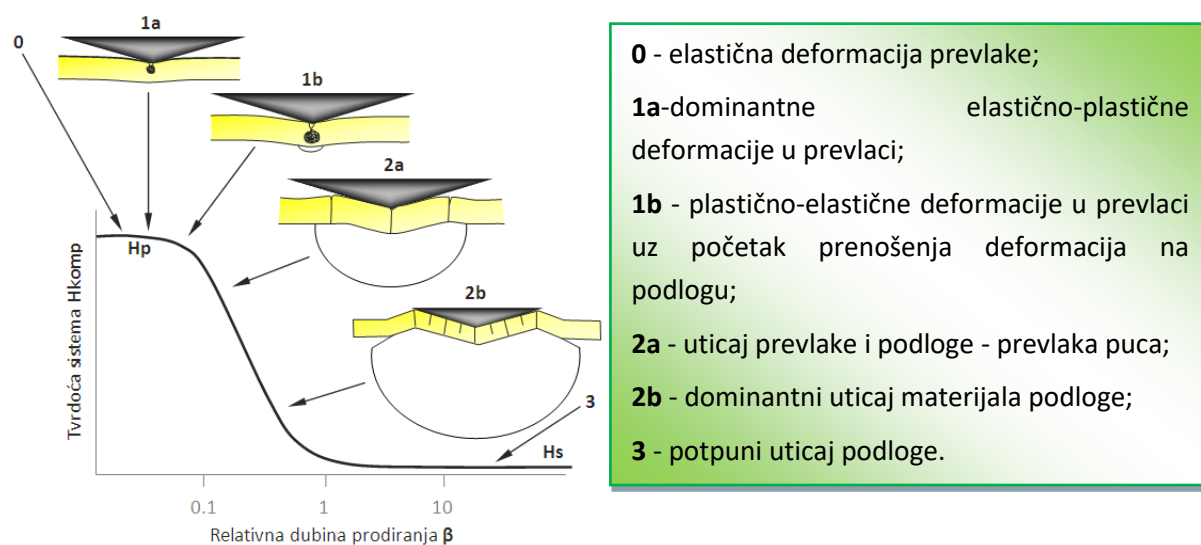
Slika 3.7b. prikazuje šemu uređaja za nanoutiskivanje. Elektromagnetni kalem služi za pomeranje utiskivača. Kapacitivni senzor, smešten blizu vrha utiskivača, kontroliše vertikalno pomeranje utiskivača. Dve opruge osiguravaju da kretanje osovine utiskivača uvek ostane vertikalno i da ne dođe do izvijanja u toku utiskivanja. Magnetne barijere izoluju uzorak i vrh utiskivača od uticaja elektromagnetnog polja koje je stvoreno pomoću kalema. Prikazana šema uređaja (Slika 3.7b.) predstavlja novije rešenje koje uključuje referentni prsten koji omogućava merenje dubine prodiranja od gornje površine uzorka. Ovakva konstrukcija ima niz prednosti: velika tačnost merenja dubine prodiranja, kratko vreme merenja, zanemarljiva termalna odstupanja, zaštita zone merenja od struje vazduha i akustičnih smetnji, zaštita merne sonde (utiskivača) od mehaničkih oštećenja.

Imajući u vidu da se prilikom instrumentisanog utiskivanja mere veoma mala pomeranja utiskivača na nano nivou uticaj okoline na ova merenja je veoma velik. Mehaničke, akustične vibracije okoline i dejstvo strujanja vazduha se prenosi na utiskivač a tako i na dubine prodiranja koje se mere prilikom određivanja tvrdoće. Stoga se ovakvi uređaji postavljaju na anti-vibracione stolove (sa vazдушnim jastucima) i u zaštitna kućišta koja smanjuju efekte akustičnih vibracija. Termičke (temperaturne) promene okoline takođe mogu da unose netačnost u merenje dubine prodiranja prilikom utiskivanja do dubina na nivou nanometra. Stoga najsavremeniji uređaji ovog tipa imaju mogućnost uzimanja u obzir termalnih dilatacija materijala neposredno pre konkretnog merenja kakav je NanoIndenter G200 kompanije Agilent Technologies.

Problematika uticaja podloge (substrata)

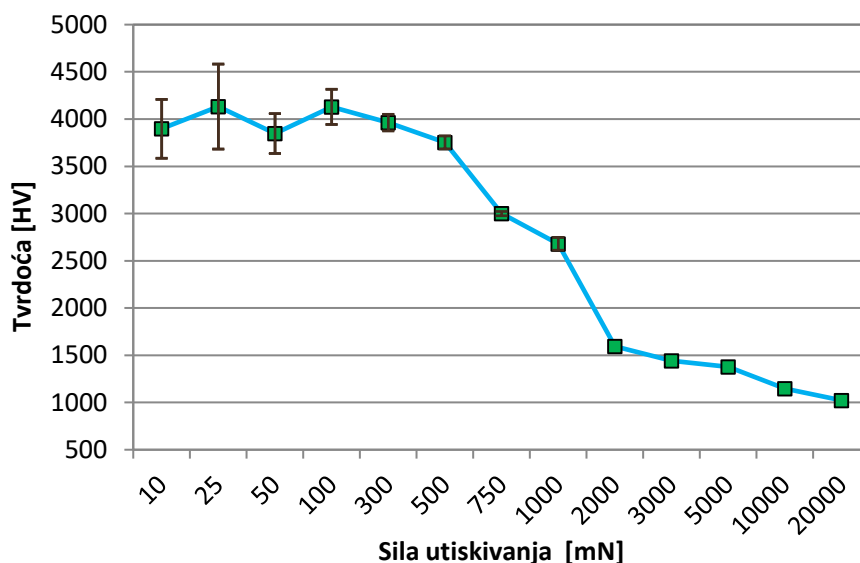
Problem pri merenju tvrdoće prevlake predstavlja uticaj podloge (osnove). Prilikom utiskivanja prizme u prevlaku, opterećenje se prenosi preko prevlake na podlogu čija tvrdoća u većoj ili manjoj meri utiče na izmereni rezultat. Prodiranje utiskivača izaziva elastično i plastično deformisanje prevlake, ali najčešće i deformisanje podloge, pa dobijena tvrdoća predstavlja tvrdoću sistema prevlaka/podloga, a ne samo prevlake. Stoga se izmerena tvrdoća naziva i kompozitna tvrdoća H_{comp} (Slika 3.8).

Ukoliko se radi o mekoj prevlaci na tvrdoj podlozi, neće doći do plastične deformacije, tj. uticaja osnove, ni pri većim dubinama prodiranja (čak i do 90% od debljine prevlake). Međutim, u slučaju tvrde prevlake na mekoj podlozi, osnova se više plastično deformiše od prevlake, pa je uticaj tvrdoće osnove u ukupnoj tvrdoći sistema veliki. **Da bi se odredila tvrdoća prevlake bez uticaja podloge preporučuje se dubina prodiranja (h) do 10% od debljine prevlake (t).** Prilikom takvog utiskivanja izražene su elastično plastične deformacije prevlake, a uticaj osnove može se javiti u manjoj meri (Slika 3.8).



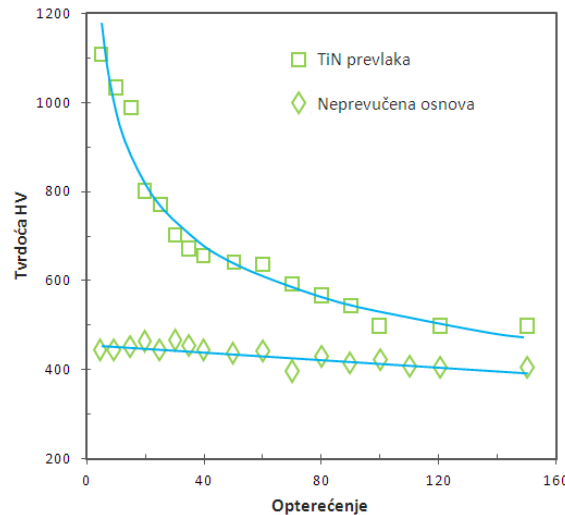
Slika 3.8 Promena tvrdoće sa dubinom prodiranja

Primer dijagrama promene promene tvrdoće za TiSiN prevlaku dobijenu magnetronskim spaterovanjem prikazana je na slici 3.9



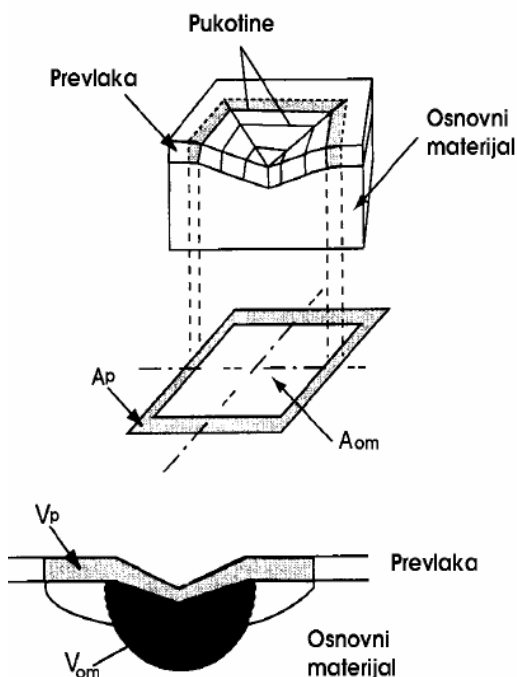
Slika 3.9 Primer dijagrama promene tvrdoće sa dubinom utiskivanja, prikazana su i odstupanja merenja (standardna devijacija) TiSiN prevlaka

Ukoliko se utiskivanje vrši u veoma tankim prevlakama ($< 1 \mu\text{m}$), primenjuju se veoma male dubine utiskivanja, izmerena tvrdoća može da raste u beskonačnost sa smanjenjem dubine prodiranja. To je efekat veličine otiska“. Taj efekat nastaje usled nagomilavanja većeg broja dislokacija i njihove međusobne interakcije ispred vrha utiskivača koje dovodi do deformacionog ojačavanja materijala usled smanjenja veličine zrna (povećanjem količine granica zrna). Ojačavanjem materijala otežava se dalje prodiranje utiskivača (plastično deformisanje materijala) i meri se zapravo veća tvrdoća materijala. Promena tvrdoće tanke TiN prevlake sa dubinom prodiranja prikazana je na slici 3.10.



Slika 3.10 Promena izmerene tvrdoće od primenjenog opterećenja (dubine prodiranja), tanka TiN prevlaka i podloga na koju je nanešena

Na slici 3.10 vidi se da tvrdoća neograničeno raste sa opadanjem dubine prodiranja što u suštini i nije tačno jer tvrdoću za veoma male dubine prodiranja nije moguće tačno odrediti. Promena tvrdoće pri malim dubinama prodiranja može se matematički modelovati pa se dobijaju krive kao na slici 3.8 . Postoji više načina za određivanje tvrdoće prevlake na osnovu izmerene kompozitne tvrdoće. Jedan je način preko površina koje nose opterećenje (Slika 3.11).



A_p i A_{om} su projekcije površina prevlake i osnovnog materijala izloženih pritisku

V_p i V_{om} su deformisane zapremine prevlake i osnovnog materijala.

Slika 3.11 Šematski prikaz deformisanih oblasti prevlake i osnove: odnos nosećih površina i određivanje deformisanih zapremina kod pravila mešavine prevlaka/osnova.

Tvrdoća prevlake na osnovu analize površina koje nose opterećenje može se odrediti na osnovu sledećeg izraza:

$$H_{komp} = \frac{A_p}{A} \cdot H_p + \frac{A_{om}}{A} \cdot H_{om}$$

gde su:

H_{komp} – izmerena tvrdoća

H_p – tvrdoća prevlake

H_{om} - tvrdoća osnove

A - projekcija ukupne površine utiskivanja

A_p i A_{om} - projekcije površine prevlake/osnove, koje nose opterećenje utiskivanja.

Tvrdoća prevlake se može odrediti takodje na osnovu deformisanih zapremina:

$$H_{komp} = \frac{V_p}{V} \cdot H_p + \frac{V_{om}}{V} \cdot \chi^3 \cdot H_{om}$$

gde su:

V – ukupna deformisana zapremina

V_c i V_s su definisane kao na slici 3.10

χ - empirijski koeficijent koji uzima u obzir promenu zapremine mekše osnove (V_{om}) zbog ograničenja u njenom širenju koje nameće tvrđa prevlaka.

Pored navedenih modela predlaže se i sledeći izraz koji se dobija na osnovu analize utroška rada pri utiskivanju prizme:

$$H = H_{om} + \frac{H_p - H_{om}}{1 + (\beta/\beta_0)^x}$$

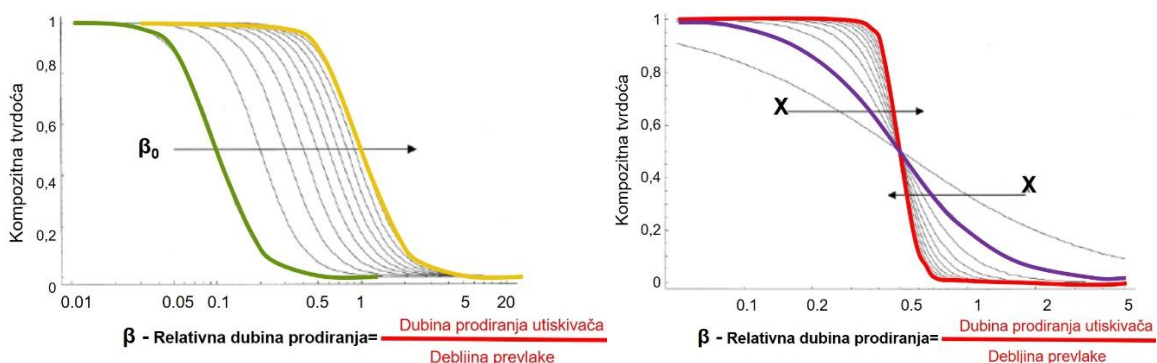
gde su:

β – relativna dubina utiskivanja

β_0 – parametar koji odgovara pomeranju prelazne zone duž apcise (dubina na kojoj je tvrdoća prevlake 50% veća od tvrdoće supstrata)

X – parametar koji opisuje prelaz između dva ekstrema tvrdoće (tvrdoće prevlake sa jedne i tvrdoće supstrata sa druge strane)

Parametri β_0 i X mogu se bolje razumeti posmatranjem slike 3.12.



Slika 3.12 Promena kompozitne tvrdoće sa relativnom dubinom prodiranja β_0 . a) X je fiksiran i prikazana promena sa porastom β_0 . b) β_0 je fiksiran i prikazana promena sa promenom X

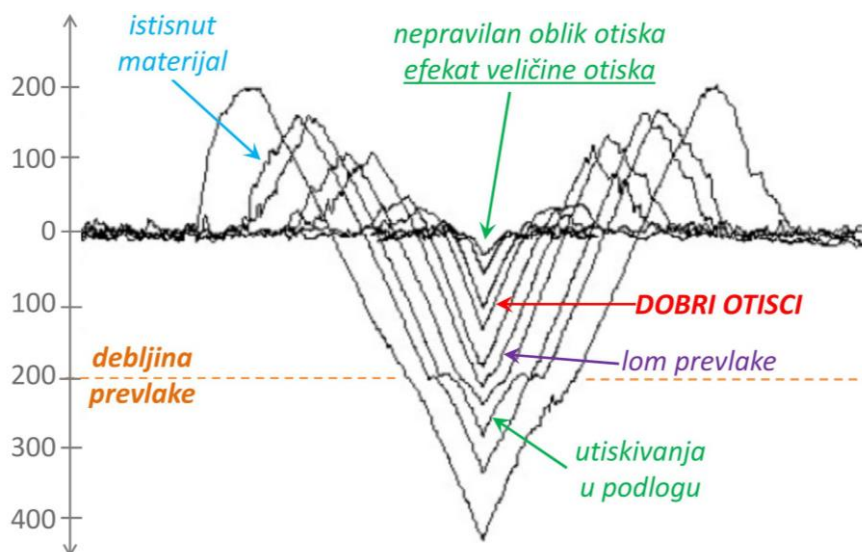
Gledajući sliku može se zaključiti da su preferirane prevlake sa većim β_0 jer one zadržavaju svoju tvrdoću na većim dubinama prodiranja. Takođe se vidi kako utiče promena parametra X, sa povećanjem istog pad tvrdoće je strmiji. Ovaj parametar zavisi od otpornosti prevlake na lom.

Faktori uticajni na merenje tvrdoće instrumentisanim utiskivanjem

Postoji više faktora zbog kojih se vrednost izmerene tvrdoće treba uzeti sa rezervom, upravo zbog toga što se često daje samo vrednost tvrdoće bez podataka o okolnostima pod kojim je ona određena. Najvažniji od tih faktora su:

- materijala podloge.
- nehomogenosti u prevlaci, pošto utiskivanje u zone sa različitim osobinama (hemijskim, orijentacionim, koncentracijama grešaka itd.) daje različite rezultate.
- žilavost prevlake i adhezija prevlake sa podlogom utiče na vrednost tvrdoće sistema prevlaka/podloga (što se uvek zapravo i meri)
- istiskivanje (naboravanje) materijala u okolini otiska, najčešće mekanih materijala, utiče na površinu stvarnog kontakta koji utiskivač u (slika 3.13)
- efekat veličine otiska – zbog ovog efekta se ne mogu jednostavno izmeriti stvarne vrednosti tvrdoće pri veoma malim dubinama utiskivanja, već se iste dobijaju pomoću matematičkih modela. Ovaj efekat nastaje kao posledica nagomilavanja dislokacija ispred vrha utiskivača, njihove interakcije i smanjenja zrna usled njihovog dejstva. Veličina zrna ima uticaj na merenje tvrdoće usled dejstva granice zrna (koje se sastoje od nakupina grešaka). Što je veličina zrna manja to je uticaj granice zrna na merenje tvrdoće izraženiji. Na slici 3.13 može se videti nepravilnost u otisku nastalom pri malim dubinama utiskivanja.
- vrednost relativne dubine utiskivanja koja zavisi i od debljine prevlake a i od vrese prevlaka na kojoj se meri tvrdoća

Navedeni uticajni faktori svedoče o delikatnosti određivanja tačne vrednosti tvrdoće prevlake, tj. O složenosti problema za koji se naizgled čini trivijalnim.



Slika 3.13 Profili tragova utiskivanja u prevlaku debljine 200nm dobijeni su različitim silama, pri čemu su postignute različite dubine; prikaz fenomena koji nastali u ovakvom procesu