

Mobilno ispitivanje tvrdoće

Vodič za primjenu instrumenata Krautkramer

Dr. Stefan Frank

GE imagination at work



Mobilno ispitivanje tvrdoće - Vodič za primjenu

Dr. Stefan Frank

1. Uvod	4
1.1 Što je tvrdoća?	4
1.2 Zašto se ispituje tvrdoća?	5
1.3 Može li se tvrdoća ispitivati na licu mjesta?	5
2. UCI metoda (MIC 10, MIC 20) Standardizirano u skladu s ASTM A 1038	5
2.1 Metoda	5
2.2 Odabir prikladne UCI sonde	6
3. Metoda odskoka (DynaPOCKET, DynaMIC i MIC 20) standardizirano sukladno ASTM A 956	8
3.1 Metoda	8
3.2 Odabir prikladnog udarnog mehanizma	9
4. Optička metoda gledanja kroz penetrator (eng. Through-Indenter-Viewing, TIV)	10
4.1 Metoda	10
4.2 Odabir prikladne sonde	12
5. Tvrdomjeri – Pregled	13
5.1 DynaPOCKET	1Error! Bookmark not defined.
5.2 DynaMIC	1Error! Bookmark not defined.
5.3 MIC 10	1Error! Bookmark not defined.
5.4 MIC 20	14
5.5 TIV	14
6. Različite metode u području ispitivanja tvrdoće	14
6.1 Odabir metode mjerenja	14
6.2 Važnost veličine otiska	15
6.3 Odnos između dubine penetracije i minimalne debljine za premaze	16
6.4 Ispitivanje tvrdoće na zavarenim spojevima (ZUT)	16
6.5 Zahtjevi za masu kod ispitnog uzorka	17
6.6 Zahtjevi za debljinu stijenki	17
6.7 Kvaliteta površine	18
6.8 Rukovanje, poravnavanje i učvršćivanje	18
6.9 Kalibriranje	18
6.10 Provjera radnih svojstava instrumenta	20
7. Sažetak i pomoć pri odabiru prikladne metode ispitivanja	20
7.1 UCI metoda (MIC 20/MIC 10)	21
7.2 Metoda odskoka (MIC 20 / DynaMIC / DynaPOCKET)	21
7.3. Optička metoda – TIV	21
7.4 Osnovna pitanja za korisnika	22

1. Uvod

Mobilno ispitivanje tvrdoće je u porastu: pod pritiskom potrebe za stalnim smanjivanjem troškova i boljom kvalitetom, mobilno ispitivanje u suvremenim proizvodnim procesima u odnosu na statičko ne doprinosi samo brzinom, već i ekonomičnošću. Mogućnosti primjene su široke i obuhvaćaju male i velike komponente, a pogotovo one na teško dostupnim položajima.

Postoje tri različite fizikalne metode koje su u području ispitivanja tvrdoće posebno priznate: statička UCI metoda (eng. Ultrasonic Contact Impedance), dinamička metoda ispi-

tivanja tvrdoće i optička TIV metoda (eng. Through-Indenter-Viewing). Odabir metode ovisi o karakteristikama ispitnog objekta. Tvrtka Krautkammer u ponudi ima pet serija instrumenata za mobilno ispitivanje tvrdoće koji rade na principu UCI, odskoka i TIV: DynaPOCKET, DynaMIC, MIC 10, MIC 20 i TIV.

Vodič za primjenu objašnjava osnovne principe ovih metoda ispitivanja i daje njihovu usporedbu na primjerima iz prakse, primjerice za ispitivanje tvrdoće u zoni utjecaja topline (ZUT) na zavarenim spojevima.

Pored toga, posebna pozornost posvećena je faktorima koji utječu na izmjerene vrijednosti, kao što je obrada površine na ispitnom mjestu ili masa ispitnih dijelova te njihova debljina.

1.1 Što je tvrdoća?

U pogledu metalnih materijala tvrdoća je oduvijek bila (i još uvijek je) predmetom rasprave metalurga, strojara i znanstvenika koji istražuju materijale. Zato nije neobično što za pojam tvrdoće postoje brojne definicije. Uz pojam tvrdoće vežu se različita svojstva poput otpornosti na habanje, ponašanje pri deformiranju



Slika 1: Ispitivanje tvrdoće s MIC 20 u kombinaciji s potpornjem MIC 227 i UCI sondom u zoni utjecaja topline (ZUT) na zavarenom spoju.



Slika 2: Ispitivanje tvrdoće metodom odskoka (DynaMIC) na pogonskom kotaču velikog hidrauličnog rovokopača.



Slika 3: Ispitivanje tvrdoće s DynaPOCKET na lancu stroja za iskapanje u otvorenom kopu.



Slika 4: Optičko ispitivanje tvrdoće TIV mjeracom. Provjera prije završnog sklapanja.

čvrstoća na vlak te moduli elastičnosti ili Youngovi moduli.

Ako se želi međusobno usporediti dobivena očitavanja, kako bi se dobila upotrebljiva vrijednost tvrdoće, neophodno je dati točan opis metode. Međutim, ako očitavanje ovisi o metodi, onda se jasno može zaključiti da tvrdoća nije fizikalna kvantiteta nego da je to nužno parametar.

Ispitivanje tvrdoće je skoro potpuno nerazorno te se u mnogim slučajevima koristi za utvrđivanje parametara za razlikovanje i opisivanje materijala. Na primjer, vrijednosti tvrdoće mogu nam lako pružiti podatke o svojstvima čvrstoće materijala.

Pojam tvrdoća općenito se shvaća kao otpornost materijala na prodiranje predmeta napravljenih od tvrdih materijala.

Tvrdoća stoga nije osnovna kvantiteta materijala, već uvijek njegova reakcija na određeno opterećenje ili metodu ispitivanja. Vrijednost tvrdoće izračunava se na temelju reakcije materijala na opterećenje.

Ovisno o metodi, nakon ispitivanja mogu se odrediti druge numeričke vrijednosti koje se pripisuju i koje su karakterizirane:

- oblikom i materijalom penetratora;
- vrstom i veličinom opterećenja, npr. ispitno opterećenje.

Različite metode ispitivanja mogu se ugrubo podijeliti u dvije skupine:

a) Statička metoda: Tom metodom ispitivanja opterećenje se primjenjuje statički ili dijelom statički. Nakon uklanjanja pokusnog opterećenja, vrijednost tvrdoće definira se kao omjer ispitnog opterećenja i površine odnosno projiciranog područja trajnog ispitnog otiska (Brinell, Vickers ili Knoop). U ispitivanju prema Rockwellu tvrdoća se određuje mjerenjem dubine prodiranja penetratora uslijed ispitnog opterećenja.

b) Dinamička metoda: Za razliku od statičke metode, opterećenje se u ovom slučaju primjenjuje udarom, a tvrdoća se određuje na temelju „gubitka energije“ penetratora.

Uobičajena praksa, a često i neophodna, je da se vrijednosti tvrdoće označuju nekom drugom skalom od one koja se koristi za njihovo mjerenje. Pritom se u obzir uvijek mora uzimati sljedeće:

- Ne postoje općenito primjenjivi odnosi za međusobno pretvaranje vrijednosti tvrdoće.
- Pretvaranje je moguće kad je pretvorbeni odnos utvrđen statistički utemeljenim usporednim mjerenjima.
- Pretvorbeni odnosi iz nacionalnih i međunarodnih standarda samo su u ograničenoj mjeri primjenjivi na određene skupine materijala.

U instrumentima serije MICRODUR (MIC 10 i MIC 20) i mjeračima tvrdoće tzv. metodom odskoka (Dyna-POCKET, DynaMIC, MIC 20), kao i optičkim mjeračima tvrdoće TIV pohranjeni su i mogu se odabrati različiti odnosi pretvaranja, kako su opisani u standardima DIN 50 150 i ASTM E 140.

1.2 Zašto se ispituje tvrdoća?

U proizvodnim procesima tvrdoća materijala ili komponenti uglavnom se ispituje iz dva razloga: Prvi je utvrđivanje svojstava novog materijala, a drugi je osiguranje kvalitete odnosno potvrda da su zadovoljene potrebne specifikacije.

1.3 Može li se tvrdoća ispitivati na licu mjesta?

Kod konvencionalnih mjerača tvrdoće prema Rockwellu, Brinellu ili Vickersu uvijek je potrebno dostaviti ispitni dio na mjerenje. Kako to iz praktičnih razloga, a ponajprije iz razloga geometrije, to nije uvijek moguće, razvijeni su mali prijenosni tvrdomjeri koji omogućuju brzo ispitivanje komponenti na licu mjesta.

Pritom se primjenjuju različite metode. Većina prijenosnih mjerača tvrdoće prema metodama UCI, odskoka i TIV uspješno se primjenjuju u praktičnom radu na terenu.

2. UCI metoda (MIC 10, MIC 20)

Standardizirano u skladu s ASTM A 1038

2.1 Metoda

Kao i kod ispitivanja tvrdoće kod Vickersa ili Brinella, u metodi ispitivanja ultrazvučnom kontaktnom impedancijom (eng. Ultrasonic Contact Impedance ili kraće UCI)

također je riječ o veličini otiska u materijalu nakon utiskivanja ispitnog opterećenja. Međutim, dijagonale ispitnog otiska za određivanje vrijednosti tvrdoće ne utvrđuju se optički, kako je uobičajeno, već se

područje otiska elektronički otkriva mjerenjem pomaka frekvencije ultrazvuka. UCI metoda može se ilustrirati malim mislenim pokusom. UCI sonda u osnovi se sastoji od Vickersovog dijamanta pričvršćenog

na vrhu metalne šipke (Slika 5). Piezo-električni pretvarači pobuđuju šipku u longitudinalnu oscilaciju. Umjesto metalne šipke (koju nazivamo oscilirajuća šipka) zamislite veliku spiralnu oprugu koja je jednim krajem pričvršćena, a slobodnim krajem oscilira pri rezonantnoj frekvenciji od 70 kHz. Na samom vrhu opruge nalazi se kontaktna plo-



Slika 5: Shematski prikaz UCI metode (Ispitno opterećenje/oscilirajuća šipka/Vickersov dijament/materijal za ispitivanje)

čica, ili Vickersov dijament. Ispitni materijal s kojim Vickersov dijament dolazi u kontakt također se može zamisliti kao sustav manjih spiralnih opruga postavljenih okomito na površinu - kao atomsku vezu dva atoma međusobno povezanih „oprugom“. Ako Vickersov dijament takne ijednu od tih „atomskih opruga“, i to od vrlo tvrdog materijala u koji dijament može samo malo prodrijeti, i posljedično tome proizvesti tek mali otisak, onda se dodatna opruga, t.j. masa, veže za veliku spiralnu oprugu. To dovodi do pomaka rezonantne frekvencije.

Pomak frekvencije bit će veći kad se dotaknu dodatne „opruge“, što znači da ako dijament prodire dublje u materijal srednje tvrdoće, otisak je veći. Analogno tome, do najvećih pomaka frekvencije dolazi kod mekih materijala, jer dijament prodire dublje u materijal i ostavlja veći otisak.

Pomak frekvencije proporcionalan je veličini ispitnog otiska koji je napravio Vickersov dijament. Zato se dijagonale otiska radi određivanja vrijednosti tvrdoće ne utvrđuju optički, kao što je uobičajeno, već se područje otiska elektronički otkriva mjerenjem pomaka frekvencije - i to u samo nekoliko sekundi.

I to je cijela tajna UCI metode ispitivanja tvrdoće: Pomak frekvencije proporcionalan je veličini Vickersovog ispitnog otiska. Jednadžba 1. opisuje taj temeljni odnos u usporedbi s definicijom vrijednosti tvrdoće po Vickersu.

Naravno, takav pomak frekvencije na sličan način ovisi i o konstanti opruge kod naših malih „atomskih opruga“.

Primijenjeno na ispitni materijal, to zovemo modul elastičnosti ili Youngov modul. Nakon kalibriranja, UCI metoda može se koristiti za sve materijale koji pokazuju taj modul elastičnosti. Sonde su tvornički kali-

brirane na slabo legirani ili nelegirani čelik, no suvremeni instrumenti za ispitivanje mogu se isto tako brzo kalibrirati na druge materijale poput titana ili bakra, na samom mjestu ispitivanja.

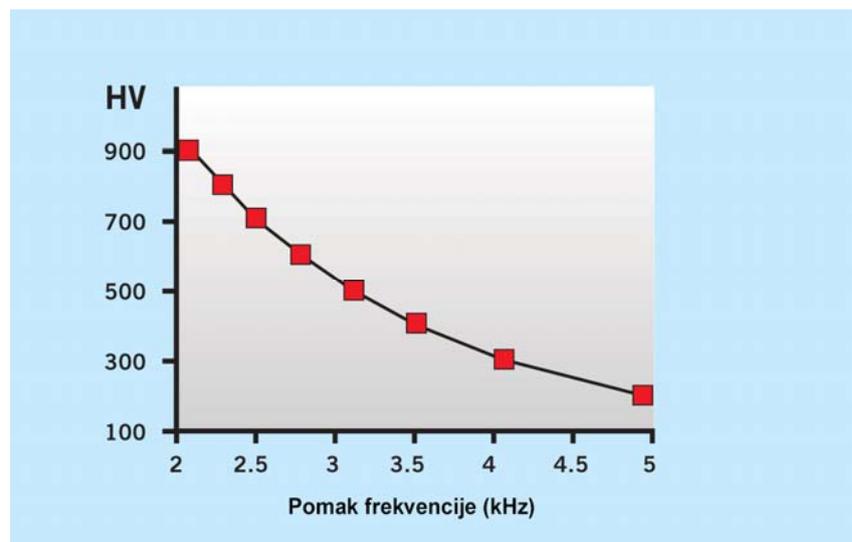
2.2 Odabir prikladne UCI sonde

Za provedbu ispitivanja na temelju UCI principa, sonda sa šipkom koja na kontaktnom kraju ima pričvršćen Vickersov dijament oscilira na frekvenciji ultrazvuka, a pobuđuju je piezoelektrični keramički pretvarači.

$$\Delta f = f(E_{\text{eff}}, A); HV = F/A$$

Δf	= pomak frekvencije
A	= područje otiska
E_{eff}	= efektivni Youngovi moduli
HV	= Tvrdoća po Vickersu
F	= Ispitno opterećenje

Jednadžba 1: Pomak frekvencije proporcionalan je veličini otiska Vickersovog penetratora.



Slika 6: Pomak frekvencije oscilacijske šipke kao funkcija tvrdoće (HV)

Opruga primjenjuje opterećenje, a frekvencija šipke mijenja se u razmjeru s kontaktnim područjem otiska Vickersovog dijamanta. Na taj se način tvrdoća ne utvrđuje optički preko dijagonala otiska, kao što bi normalno bio slučaj kod statičkih tvrdomjera, već elektroničkim mjerenjem pomaka frekvencije u roku od nekoliko sekundi.

Instrument neprekidno prati frekvenciju, izračunava vrijednost i u istom je trenutku prikazuje.

UCI metoda najprikladnija je za ispitivanje homogenih materijala. U Tablici 1 prikazano je šest ispitnih opterećenja koje se koriste kod različitih UCI sondi.



Slika 7:
Različiti modeli UCI sondi.

Ispitno opterećenje	Dostupni modeli sondi	Prednost ili korist	Uobičajena primjena
98 N (10 kgf)	MIC 2010 Standardna duljina Ručna	Najveći otisak; zahtijeva minimalnu pripremu površine	Mali otkivci, ispitivanje zavarenih spojeva, ZUT
50 N (5 kgf)	MIC 205 Standardna duljina Ručna MIC 205L Produljena Ručna	Rješava opće probleme u primjeni 30 mm produljene duljine	Indukcijski ili naugličeni mehanički dijelovi, npr. bregaste osovine, turbine, zavareni spojevi, ZUT. Mjerenje u žlijevovima, zupčanim parovima i korijenima
10 N (1 kgf)	MIC 201 Standardna duljina Ručna MIC 201L Produljena Ručna	Jednostavna primjena opterećenja; kontrolirano ispitivanje na oštrm radijusu Mjerenje na složenim geometrijama	lonski nitrirani strojevi za štancanje i kalupi, kokile, preše, dijelovi s tankim stijenkama Ležajevi, zupčanci
8 N (0,9 kgf)	MIC 211 Motorna sonda	Automatska primjena opterećenja	Gotovi precizni dijelovi, zupčanci, staze kugličnih ležajeva
3 N (0,3 kgf)	MIC 2103 Motorna sonda	Automatska primjena opterećenja	Slojevi, npr. slojevi bakra i aluminija na čeličnim cilindrima ($\geq 40 \mu\text{m}$), cilindri za roto-gravure, premazi, očvršćeni slojevi ($\leq 20 \mu\text{m}$)
1 N (0,1 kgf)	MIC 2101 Motorna sonda	Najplići otisak	Tanki slojevi polirane površine

Tablica 1:
Modeli UCI sondi, prednosti i uobičajena primjena

3. Metoda odskoka (DynaPOCKET, DynaMIC i MIC 20) standardizirano sukladno ASTM A 956

3.1 Metoda

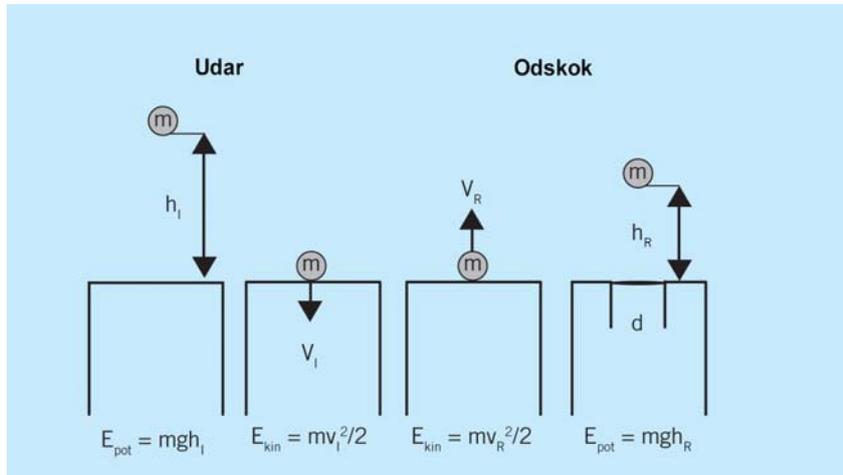
Kod tvrdomjera koji rade po Leebovoj metodi ili metodi odskoka, veličina proizvedenog otiska također ovisi o tvrdoći materijala. Ona se, međutim, u ovom slučaju mjeri preko gubitka energije udarnog tijela.

Slika 8. ilustrira fizikalni princip ispitivanja tvrdoće odskokom.

Opruga upucava masu, u ovom slučaju udarno tijelo koje na vrhu ima kuglicu od volframovog karbida, u ispitnu površinu pri definiranoj brzini. Udar stvara

plastičnu deformaciju na površini uslijed koje udarno tijelo gubi dio izvorne brzine, pa tako vrijedi da što je materijal mekši, gubitak povratne brzine je veći. Brzina prije i nakon udara mjeri se bezkontaktnim načinom. To se postiže malim permanentnim magnetom u udarnom tijelu (Sl. 9) koji prolaskom kroz zavojnicu generira inducirani napon, a taj je napon proporcionalan brzini (v. Sl. 10).

Vrijednost tvrdoće po Leebu (HL), nazvana prema izumitelju metode odskoka D. Leebu, izračunava se iz omjera udarne i povratne brzine. Leeb je tvrdoću definirao na sljedeći način:

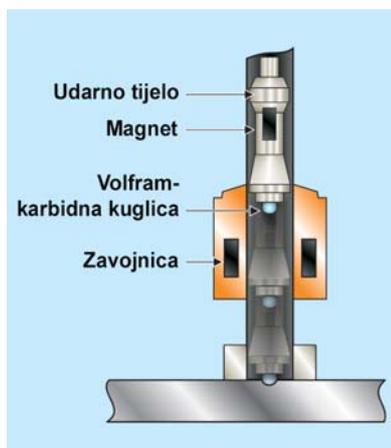


$$HL = V_R / V_1 * 1000$$

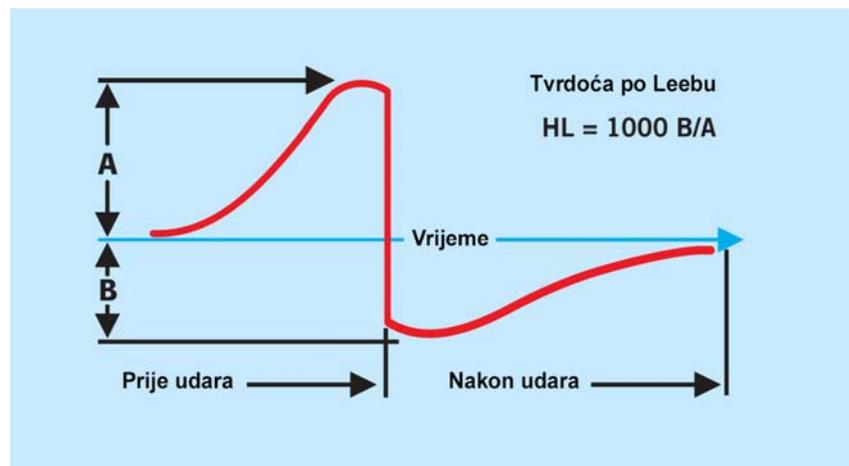
Slika 8: Osnovni princip metode mjerenja tvrdoće odskokom: d = promjer otiska
 E_{pot} = potencijalna energija
 E_{kin} = kinetička energija

m = masa
 h_1, h_R = visina prije/nakon udara
 V_1, V_R = brzina prije/nakon udara

Jednadžba 2: Tvrdoća prema Leebu



Slika 9: Presjek udarnog mehanizma.



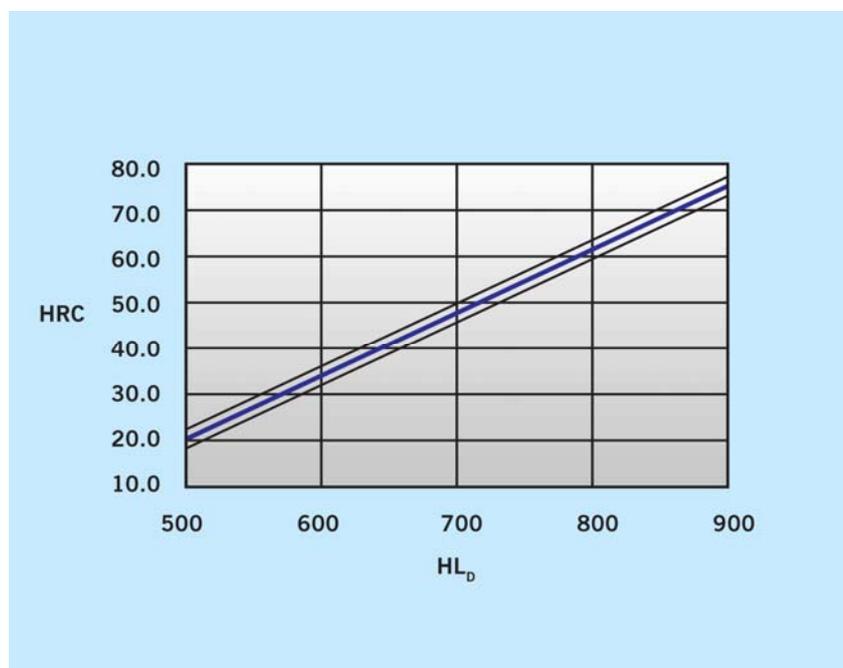
Slika 10: Shematski prikaz tijeka naponskog signala koji je proizvelo udarno tijelo prolaskom kroz zavojnicu. Signal prikazuje napon prije i nakon udara. (VDI Izvještaj broj 208, 1978).

U pogledu ove relativno mlade metode ispitivanja tvrdoće, nameće se pitanje u kojoj mjeri korisnici zaista prihvaćaju ili primjenjuju Leebovu skalu. Do sada se ona koristila u samo nekoliko slučajeva za specifikacije i certifikate. Izmjereni omjer brzine uglavnom se pretvarao u neku od konvencionalnih jedinica tvrdoće (HV, HB, HS, HRB, HRC ili N/mm²). Upravo je ta mogućnost pretvorbe doprinijela sve većem prihvaćanju ove vrste mjerača na području ispitivanja tvrdoće.

Ako se izmjerenu tvrdoću želi pretvoriti u neku drugu skalu (po mogućnosti u rezultat neke potpuno druge metode ispitivanja tvrdoće), za to nemamo nijednu matematičku formulu. Iz tog su razloga, nakon odgovarajućeg broja provedenih pokusa, empirijski utvrđene takozvane pretvorbene tablice. U tu je svrhu izmjerena tvrdoća određenog materijala pomoću različitih metoda ispitivanja te je utvrđen odnos između pojedinačnih skala (Sl. 10).

Za pravilno i pouzdano pretvaranje moraju se primijeniti pretvorbene tablice dobivene iz rezultata dovoljno velikog broja mjerenja tvrdoće, pri kojima su na dotičnom materijalu korištene obje skale.

Glavni razlog zašto se u obzir moraju uzeti različite skupine materijala je utjecaj elastičnih svojstava (Youngovih modula) na ispitivanje tvrdoće metodom odskoka. Dva materijala s istom „stvarnom tvrdoćom“ imaju, u određenim uvjetima, zbog različitih vrijednosti Youngovih modula različite vrijednosti tvrdoće po Leebu. To je razlog zašto ne postoji univerzalni princip pretvaranja iz Leebove tvrdoće u konvencionalne skale tvrdoće. U suvremenim uređajima za ispitivanje tvrdoće se iz tog razloga može odabrati između nekoliko skupina materijala, ispod kojih se nalaze odgovarajuće pretvorbene tablice (v. Tablica 2).



Slika 11: Pretvaranje Leebove tvrdoće (HL) u Rockwellovu C (HRC) kao tipični primjer pretvorbene krivulje kako su pohranjene u tvrdomerima na principu odskoka. Te su krivulje utvrđene empirijski, mjerenjem različitih ispitivih objekata s različitim vrijednostima tvrdoće po HL i HRC.

Skupina materijala

Slabo legirani/nelegirani i lijevani čelik

Alatni čelik

Čelik otporan na koroziju

Sivo lijevano željezo

Nodularni lijev

Lijevene aluminijske legure

Mjed (CuZn)

Bronca (CuAl, CuSn)

Kovane legure bakra

Tablica 2:

Pohranjene skupine materijala u uređajima za ispitivanje tvrdoće DynaPOCKET, DynaMIC i MIC 20.

3.2 Odabir prikladnog udarnog mehanizma

Varijante mjerača tvrdoće na principu odskoka obuhvaćaju instrumente MIC 20 TFT i DynaMIC /DynaMIC DL s tri inačice udarnog mehanizma te kompaktni DynaPOCKET. Rad svih navedenih instrumenata temelji se na Leebovoj metodi.

Udarni mehanizam koristi oprugu za upucavanje udarnog tijela kroz dovodnu cijev u ispitni uzorak. Na putu do uzorka magnet, koji se nalazi u udarnom tijelu, generira signal u zavojnici koja okružuje dovodnu cijev. Udarno se tijelo nakon udara odbija od površine i pritom inducira drugi signal u zavojnicu. Instrument tada izračunava tvrdoću pomoću omjera napona i analizira njihove faze kako bi automatski kompenzirao promjenu smjera.

Tvrdomeri tvrtke Krautkramer MIC 20, DynaMIC i DynaPOCKET jedini su mjerači tvrdoće koji imaju ovu patentiranu značajku obrade signala koja omogućuje automatsko ispravljanje smjera.

Koji su instrumenti i udarni mehanizmi prikladni za odgovarajuću namjenu ovisi o potrebnoj energiji

udara i vrsti ili veličini penetratora. Pored uređaja DynaPOCKET, s integriranim udarnim mehanizmom

D, na izbor stoje tri udarna mehanizma: Dyna D, Dyna E i Dyna G za MIC 20 i DynaMIC (v. Tablica 3).

Model	Penetrator	Energija pri udaru (Nmm)	Uobičajena primjena
Dyna D	3 mm Volfram-karbidna kuglica	12	Općenito ispitivanje homogenih materijala
Dyna E	Dijamant	12	> 50 HRC, npr. valjaonički valjci od kovanog i očvršćenog čelika
Dyna G	5 mm Volfram-karbidna kuglica	90	< 650 HB, npr. za velike odljevke i otkivke; Potrebna je manja površina (za razliku od Dyna D)
DynaPOCKET	3 mm Volfram-karbidna kuglica	12	Kompaktni tvrdomjer na principu odskoka

Tablica 3:

Udarni mehanizmi za ispitivanje tvrdoće metodom odskoka, prednosti i uobičajene primjene.

4. Optička metoda „gledanja kroz penetrator“ (eng. Through-Indenter-Viewing, TIV)

4.1 Metoda

TIV je prijenosni instrument za optičko ispitivanje tvrdoće prema Vickersu pod ispitnim opterećenjem (Sl. 11). Optički sustav koji uključuje CCD kameru omogućuje gledanje „kroz dijamant“ (gledanje kroz penetrator). Pomoću ove nove metode po prvi puta je moguće izravno, na zaslonu promatrati postupak u kojem Vickersov dijamant prodire u ispitni materijal.

Zahvaljujući optičkoj metodi mjerenja, TIV tehnika može se koristiti za provedbu ispitivanja tvrdoće bez dodatnih kalibriranja na različite materijale.

Štoviše, statička primjena pokusnog opterećenja također omogućuje mjerenje tankih i malih objekata te premaza.

Čim se dosegne pokusno opterećenje, određuju se duljine dijagonala i pretvaraju u vrijednost tvrdoće prema Vickersovoj definiciji. To se ocjenjivanje može izvoditi ručno i automatski. TIV mjerači tvrdoće sadrže tablice sukladno DIN 50150 i ASTM E 140 za pretvaranje izmjerene tvrdoće u ostale skale.

Slika otiska ili Vickersovog dijamanta na zaslonu ne omogućuje samo trenutačnu provjeru i ocjenu kvalitete izmjerene vrijednosti, već omogućuje i izravnu provjeru stanja penetratora (Vickersovog dijamanta).

Zahvaljujući optičkoj metodi ispitivanja tvrdoće, TIV može otvoriti nova polja primjene za mobilno ispitivanje tvrdoće na kojima kon-

vencionalni instrumenti do danas nisu mogli pružiti pouzdane rezultate.



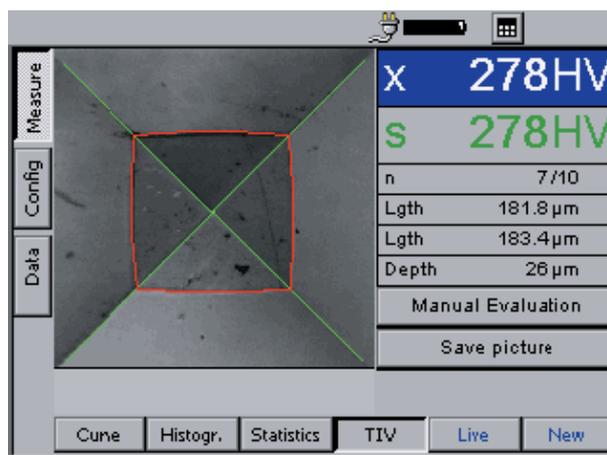
Slika 12: TIV mjerač tvrdoće u terenskoj upotrebi.

„Gledanje kroz penetrator“ pri ispitivanju tvrdoće omogućuje:

- neovisnost smjera mjerenja,
- ispitivanje različitih materijala bez kalibriranja (neovisno o materijalu),
- primjenu na tankim i lakim komponentama,
- primjenu na elastičnim materijalima.

TIV je prvi prijenosni tvrdomjer koji ne utvrđuje veličinu otiska Vickersovog dijamanta te posljedično tome ne određuje tvrdoću neizravno, već izravno: „Gledanje kroz penetrator“ znači da je moguće promatrati kako otisak Vickersovog dijamanta „raste“ na površini ispitnog uzorka prilikom same primjene ispitnog opterećenja. To je postignuto posebnom kombinacijom optičkih leća, uključujući CCD kameru za digitalizaciju slike otiska. U trenutku dosezanja ispitnog opterećenja instrument pohranjuje sliku otiska ili dijamanta te je automatski ocjenjuje.

U prvom koraku, za određivanje rubova otiska koristi se poseban softver. Zatim se za određivanje duljina dviju dijagonala uzimaju sjecišta s rubovima Vickersovog dijamanta (kut od 136°) koja su prikazana na zaslonu. Prosječna vrijednost dijagonala tada se koristi



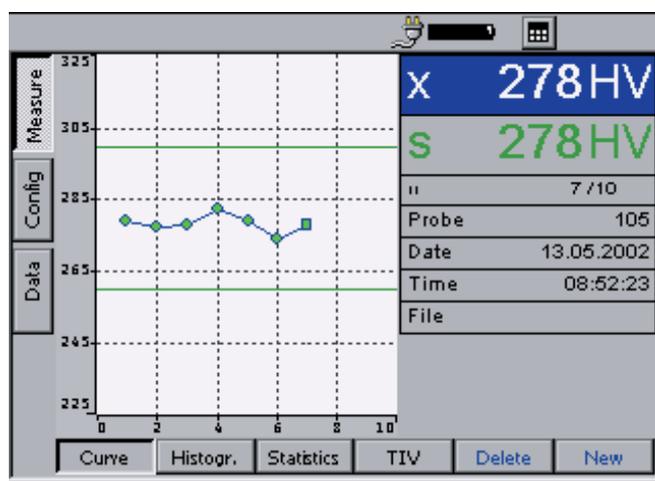
Slika 13: Mjerenje tvrdoće primjenom TIV metode. Otisak Vickersovog dijamanta prikazuje se na zaslonu i automatski ocjenjuje.

za izračunavanje vrijednosti tvrdoće prema Vickersovoj definiciji. Automatsko procjenjivanje nije samo brzo, u usporedbi s konvencionalnim mjernim mikroskopima, nego i otklanja subjektivne učinke od strane korisnika koji su posebno izraženi pri ručnoj procjeni Vickersovog otiska.

Slika 12 prikazuje rezultat ispitivanja tvrdoće metodom gledanja kroz penetrator. Optička provjera oblika otiska je jedina metoda koja omogućuje pouzdane zaključke u pogledu kvalitete mjerenja. Jedan pogled na zaslon dovoljan je da bi se prepoznalo jesu li svojstva površine, mikro-struktura materijala ili neki drugi učinci utjecali na mjerenje.

Pored automatske procjene, instrument također omogućuje ručno ocjenjivanje Vickersovog otiska. Rubovi otiska podešavaju se ručno na uvećanoj slici na zaslonu. Duljina dijagonala ažurira se automatski te se prikazuje odgovarajuća vrijednost tvrdoće.

Prikaz Vickersovog dijamanta predstavlja dodatnu mogućnost za izravnu provjeru stanja penetratora. Bilo kakva oštećenja penetratora, poput slomljenih rubova, prepoznaju se odmah tako da se od samog početka mogu izbjeći netočna mjerenja.



Slika 14: Grafički prikaz rezultata mjerenja u obliku krivulje.

#	HV	Picture
1	279	
2	277	
3	273	
4	282	
5	279	
6	273	

Slika 15: Prikaz rezultata mjerenja u tabelarnom obliku, uključujući statističke podatke poput raspona, standardnog otklona, minimuma i maksimuma.

Rezultati slijednih ispitivanja mogu se grafički prikazati kao krivulja ili u tabelarnom obliku, uključujući statističke podatke (v. Slike 13 i 14). Svi potrebni podaci, poput prosječne i pojedinačne vrijednosti te statističkih podataka, prikazuju se ili ažuriraju tijekom mjerenja.

Glavne prednosti TIV metode postignute su statičkom primjenom ispitnog opterećenja te ručnim ili automatskim određivanjem duljina otiska koji je napravio Vickersov dijamant:

a) TIV omogućuje mobilno mjerenje tvrdoće na licu mjesta na različitim materijalima bez potrebe za dodatnim prilagodbama i kalibriranjem (v. Slika 15).

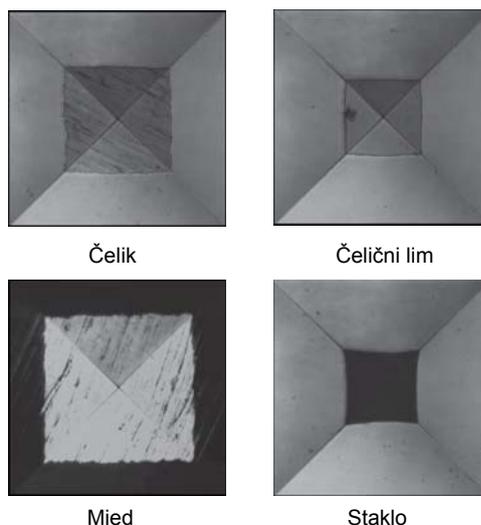
b) Zbog statičke primjene ispitnog opterećenja, TIV također omogućuje mjerenje na tankim i malim dijelovima kao što su opruge, metalni limovi i slično.

c) Slika otiska „uživo“ na zaslonu omogućuje trenutačnu analizu kvalitete mjerenja.

d) TIV je opremljen funkcijom automatske procjene Vickersovog otiska, t.j. duljine dijagonala utvrđuju se izravno i automatski.

e) Prikaz rubova dijamanta na zaslonu omogućuje provjeru stanja penetratora.

TIV otvara široku lepezu novih primjena koje prije nisu bile dostupne za prijenosne tvrdomjere.



Slika 16: Ispitivanje tvrdoće na različitim materijalima metodom gledanja kroz penetrator (TIV).

Ispitivanja tvrdoće nisu samo neovisna o ispitnim položajima i smjerovima, sada su neovisna i o materijalu i masi ili geometriji ispitnog objekta.

4.2 Odabir prikladne sonde

Za optičke TIV mjerače tvrdoće dostupne su dvije ručne sonde, s pokusnim opterećenjem od 10 N/1 kgf odnosno 50 N/5 kgf. Tablica 4 prikazuje odgovarajuće raspone mjerenja za ove sonde. Mjerni raspon tih dviju TIV sondi ograničen je optičkim sustavom koji se koristi. Veličina CCD senzora dopušta samo određenu maksimalnu veličinu otiska, tako da je u ovom slučaju minimalna vrijednost mjernog raspona unaprijed definirana optikom.

U slučaju većih vrijednosti tvrdoće,

t.j. kod manjih otisaka, razlučivost CCD kamere ograničuje mjerni raspon. Iako su pomoću sonde TIV105 provedena pouzdana i ponovljiva mjerenja na keramičkim materijalima u okviru raspona tvrdoće od 1500 HV, gornja granična vrijednost općenito je specificirana na 1000 HV. To je učinjeno zato jer se pri višim vrijednostima tvrdoće može očekivati zamjetan učinak kvalitete površine ispitnog objekta i primjene ispitnog opterećenja na rezultat mjerenja.

Sonda	Ispitno opterećenje	Raspon tvrdoće	Uobičajena primjena
TIV 101	10 N / 1 kgf	pribl. 30 – 500 HV	Optičko mjerenje tvrdoće na tankim komponentama od aluminija, bakra ili mjedi. Ispitivanje tvrdoće na tankim slojevima.
TIV 105	50 N / 5 kgf	pribl. 100 – 1000 HV	Očvršćene površine, mehanički dijelovi, polugotovi proizvodi

Tablica 4: Sonde za ispitivanje tvrdoće TIV metodom, prednosti i uobičajene primjene.

5. Tvrdomjeri - Pregled

5.1 DynaPOCKET

Metoda: Ispitivanje tvrdoće metodom odskoka

Uobičajena primjena

- tvrdi, krupnozrnati pokusni objekti
- otkivci nehomogene površinske strukture
- lijevani materijali

Pribor: primjer.

- nastavci za zakrivljene površine
- etalonske pločice



Slika 17:
DynaPOCKET

5.2 DynaMIC

Metoda: Ispitivanje tvrdoće metodom odskoka

Uobičajena primjena

- mehanički dijelovi ili jedinice motora napravljene od čelika i legura aluminija
- tvrde komponente valjkastih površina
- u proizvodnji velikih serijskih proizvoda

Pribor: primjer.

- udarni mehanizmi D, G i E
- nastavci za zakrivljene površine
- etalonske pločice
- softver UltraHARD



Slika 18:
DynaMIC

5.3 MIC 10

Metoda: Ispitivanje tvrdoće UCI metodom

Uobičajena primjena

- sitnozrnati materijal
- očvršćeni materijali
- tanki slojevi
- otvrdnjavanje: zavareni spojevi itd.

Pribor: primjer.

- potpornji
- vodilice (priklučivanje sondi)
- etalonske pločice
- softver UltraHARD



Slika 19:
MIC 10

5.4 MIC 20

Metoda: Ispitivanje tvrdoće metodama UCI i odskoka

Uobičajena primjena

- sve UCI primjene
- sve primjene metode odskoka

Pribor: primjer.

- sve UCI sonde
- svi udarni mehanizmi na principu odskoka
- potpornji
- vodilice (priklučivanje sonde)
- etalonske pločice
- softver UltraDAT



Slika 20:
MIC 20

5.5 TIV

Metoda: Optičko ispitivanje tvrdoće

Uobičajena primjena

- ispitivanje tvrdoće različitih materijala bez kalibriranja
- ispitivanje tvrdoće na tankim komponentama (npr. metalni limovi, opruge)
- očvršćene površine

Pribor: primjer.

- potpornji
- vodilice (priklučivanje sonde)
- etalonske pločice
- softver UltraDAT



Slika 21:
TIV

6. Različite metode u području ispitivanja tvrdoće

6.1 Odabir metode mjerenja

UCI metoda preporučuje se za ispitivanje sitnozrnatog materijala gotovo svih oblika i veličina. Posebno se koristi u slučajevima kad se svojstva materijala moraju odrediti u malim tolerancijama, npr. za određivanje očvršćivanja deformacijom na kovanom čeliku.

TIV metoda je skoro potpuno neovisna o ispitnom materijalu i njegovoj geometriji. Zato se može koristiti svugdje gdje su do sada konvencionalni mjerači tvrdoće zakazali: različiti materijali bez kalibriranja, tanki lagani dijelovi, metalni limovi i spiralne opruge, itd.

Ispitivanje tvrdoće metodom odskoka uglavnom se provodi na velikim, grubozrnatim materijalima, otkivcima i svim vrstama kovanog materijala zato jer vrh udarnog mehanizma od volframovog karbida proizvodi veći otisak od Vickersovog dijamanta i iz tog razloga bolje otkriva karakteristike strukture lijeva.

S druge strane, relativno mali otisci UCI sonde omogućuju ispitivanje tvrdoće zavarenih spojeva, a posebno u kritično važnim zonama utjecaja topline.

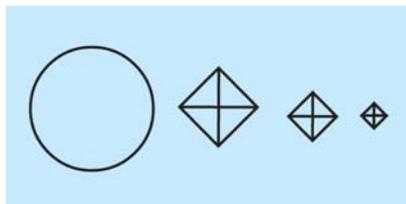
Veliki broj UCI sonde i udarnih mehanizama s različitim ispitnim op-

terečenjima ili promjerima penetratora omogućuju odabir prikladne metode i prikladne sonde/udarnog mehanizma u skladu sa željenom primjenom. Sljedeće se odnosi na upotrebu udarnih mehanizama dostupnih za DynaMIC i MIC 20: Pored Dyna D, koja je prikladna za većinu primjena, Dyna G posebno je prikladna za nehomogene površine, kao što su primjerice lijevani materijali ili otkivci, zato jer ima devet puta veću udarnu energiju, a penetrator ima veći kuglični vrh od volframovog karbida.

Primjena	UCI metoda MIC 10, MIC 20	Metoda odskoka DynaPOCKET, DynaMIC, MIC 20	TIV
Kruti dijelovi	+	++	++
Sitnozrnati materijal	-	++	o
Lijevane aluminijske i čelične legure	o	++	o
ZUT sa zavarenim spojevima	++	-	++
Cijevi: debljina stjenke > 20 mm	++	++	++
Cijevi: debljina stjenke < 20 mm	++	-	++
Metalni limovi, opruge	o	-	++
Nehomogene površine	-	+	+
Tanki slojevi	++	-	+
Teško dostupni položaji	++	+	-
++ vrlo prikladno / + prikladno / o ponekad prikladno / - neprikladno			

Tablica 5:
Primjene ispitivanja tvrdoće metodama UCI i odskoka.

Za tvrde materijale (650 HV/56 HRC), kod kojih se volfram-karbidni vrh brže troši, preporučujemo udarni mehanizam Dyna E koji ima penetrator s dijamantnim vrhom.



Slika 22:
Usporedba područja otiska udarnog mehanizma DynaD i UCI sondi MIC 2010, MIC 205 i MIC 201.

6.2 Važnost veličine otiska

Općenito vrijedi da što je veće područje otiska, to su konzistentniji rezultati ispitivanja. Za varijacije u mikro-strukturi nehomogenih materijala ili kod grubozrnatih materijala dana je prosječna vrijednost tako da se mogu postići konzistentni rezultati. Veće područje otiska također postavlja manje zahtjeva u vezi površinske obrade i pripreme površine.

Površine otiska koje ostavljaju različiti udarni mehanizmi u usporedbi su puno veće od onih koje proizvede bilo koja UCI ili TIV sonda. Mjerač na principu odskoka preporučuje se pri ispitivanju velikih odljevaka i otkivaka. Ispitivanje malih područja homogenih materijala otvrdnute površine zahtijeva pliće otiske kakve stvaraju UCI i TIV sonde.

	Dyna G 5 mm 90 Nmm	Dyna D 3 mm 12 Nmm	HV 10 MIC 2010	HV 5 MIC 205 TIV 105	HV 1 MIC 201 TIV 101	HV 0,3 MIC 2013
64 HRC		350	152	107	48	25
55 HRC	898	449	175	124	56	28
30 HRC	1030	541	249	175	79	41

Tablica 6a:
Približna veličina površine otiska (u mm).

	Dyna G 5 mm 90 Nmm	Dyna D 3 mm 12 Nmm	HV 10 MIC 2010	HV 5 MIC 205 TIV 105	HV 1 MIC 201 TIV 101	H 0,3 MIC 2013
800 HV		16	22	16	7	4
600 HV	63	28	25	20	9	5
300 HV	83	35	35	25	11	6

Tablica 6b:
Približna dubina otiska (u mm).

6.3 Odnos između dubine penetracije i minimalne debljine za premaze

Za ispitivanje tvrdoće po Vickersu, debljina ili dubina otvrdnutog sloja ili premaza, primjerice kroma na čeličnim valjcima, mora biti dovoljno velika kako bi mogla podnijeti otisak. Pravilo je da debljina treba biti najmanje deset puta veća od dubine otiska.

Dubinu prodiranja Vickersovog dijamenta možete jednostavno izračunati ako znate silu sonde i približnu tvrdoću pomoću jednadžbe 3. Formula se temelji na geometriji Vickersovog dijamenta. Stoga je primjenjiva jedino na ispitivanje tvrdoće prema Vickersu.

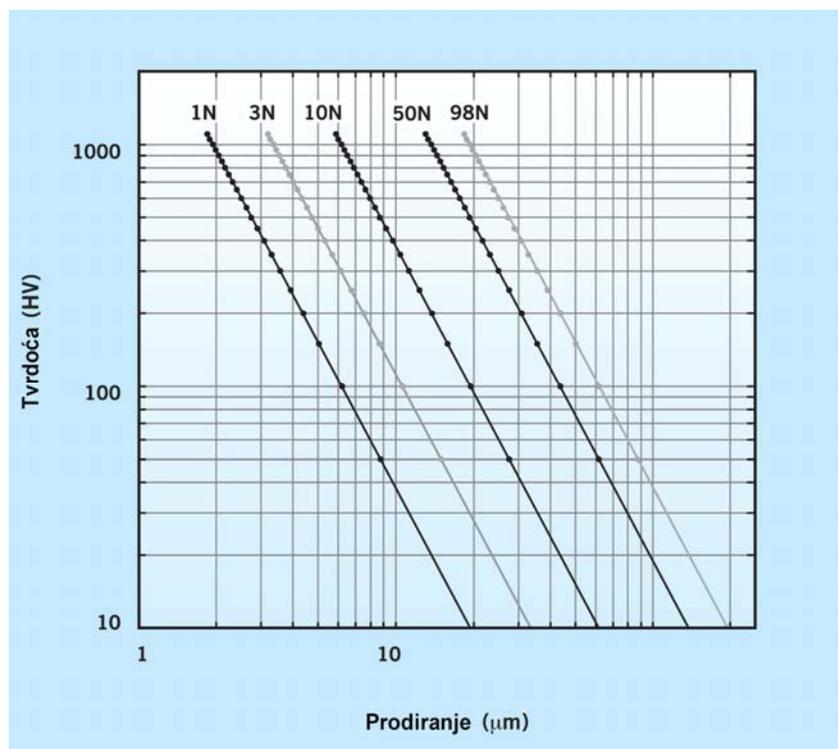
Upamtite: 10 N ≈ 1 kgf.

$$d = 0,062 \cdot \sqrt{F / HV}$$

HV	= Tvrdoća po Vickersu u HV
F	= Opterećenje u N
d	= Dubina prodiranja u mm

$$\text{Minimalna debljina } s = 10 \cdot d$$

Jednadžba 3:
Dubina prodiranja Vickersovog dijamenta.



Slika 23:
Dubina prodiranja Vickersovog dijamenta naspram tvrdoće materijala (za različita ispitna opterećenja).

6.4 Ispitivanje tvrdoće na zavarenim spojevima (ZUT)

Pomoću malih ispitnih otisaka koje ostavljaju Microdur UCI sonde moguće je primjerice utvrditi tvrdoću zavarene komponente iznad kritičnog područja zavora, tj. zone utjecaja topline. Rezultat ispitivanja tvrdoće daje informacije o pravilnom zavarivanju materijala. Na primjer, ako je sadržaj martenzita u zoni utjecaja topline prevelik, stvorit će se vrlo tvrda zona koja često uzrokuje pucanje.

Naravno, mogu se koristiti samo metode mjerenja koje pouzdano pokrivaju kritično područje zavora, tj. ZUT, s otiscima koji nisu preveliki. Samo mala ispitna opterećenja (HV 5 ili HV10) stvaraju Vickersov otisak koji se još uvijek nalazi u kritičnoj zoni utjecaja topline. HV30, HB i ispitni otisci nastali ispitivanjem na principu odskoka, kao i mjerenja pomoću Poldijevog bata izlaze iz te zone.

	Dyna D i E	Dyna G	UCI sonde	TIV
Nije potreban nosač/potporanj	> 5 kg	> 15 kg	> 0,3 kg	Nema
Potreban je nosač/potporanj	2 do 5 kg	5 do 15 kg	0,1 do 0,3 kg	ograničenja
Potreban je nosač/potporanj i vezivna pasta	0,05 do 2 kg	0,5 do 5 kg	0,01 do 0,1 kg	

Tablica 7:
Zahtjevi za masu kod ispitnog uzorka:

U tim se slučajevima određuje samo prosječna vrijednost za cijelo područje zavarana. To dovodi do manjih vrijednosti tvrdoće uslijed činjenice da je na susjednim područjima također otkrivena manja tvrdoća. Danas još uvijek nailazimo na Poldijeve batove u ispitivanju zavarana. Očividno je da ovakav ispitni otisak ukazuje na nižu vrijednost tvrdoće, što za operatera znači da daljnja toplinska obrada ZUT-a više nije potrebna. O mudrosti te odluke neka odluči čitatelj.



Slika 24:
Ispitivanje tvrdoće u zoni utjecaja topline.

6.5 Zahtjevi za masu kod ispitnog uzorka

Masa ispitnog uzorka uvijek mora biti uzeta u obzir. Iako su kriteriji mase kod Leebove metode viši od onih za UCI metodu, masa i debljina ispitnog uzorka može utjecati na rezultate obiju metoda.

Leebova metoda stvara veliku silu kratkog trajanja tijekom udara. Tanki i lagani materijali popuštaju, i to uzrokuje pogrešne vrijednosti.

Rješenje za ispitivanje malih komponenti jednostavne geometrije je strojni potporanj koji odgovara obrysima stražnje površine dijela. Potporanj učvršćuje ispitni dio i čini ga čvrstim i stabilnim. Za ekstremno tanke materijale može biti potrebna upotreba tankog filma masti ili paste za povezivanje ispitnog objekta za potporanj.

UCI metoda temelji se na mjerenju pomaka frekvencije. Ispitni objekti lakši od oko 0,3 kg mogu doći u samooscilaciju i uzrokovati pogrešna očitavanja. Gore opisana potporna pločica i povezivanje efikasna su metoda za izbjegavanje oscilacija i kod malih komponenata. Ako upotreba potporne pločice nije izvediva, odaberite sondu s manjim ispitnim opterećenjem radi smanjivanja učinka samooscilacije.

Tablica 7 dana je kao smjernica za utvrđivanje potrebe za nosačem ili potpornjem. Učinkovitost nosača ili potporna određuje se prema razini prijanjanja obrisima ispitnog uzorka.

U načelu, za TIV nema ograničenja u vezi mase ispitnog uzorka, dokle god je moguće pravilno pozicionirati sondu i primijeniti opterećenje a da se pokusni uzorak ne pomiče.

6.6 Zahtjevi za debljinu stijenki

Debljina stijenki cijevi, vodova ili ventila izrazito je važna za mobilno ispitivanje tvrdoće, pogotovo kod metode odskoka. Na primjer, kada se pri ispitivanju odskokom udarno tijelo sudari o tanku stijenku, ona će početi oscilirati poput opne na bubnju.

Pri odabiru metode ispitivanja, osim mase (Odjeljak 6.5), veliku ulogu igra i debljina stijenke. Ona može utjecati na vrijednost tvrdoće čak i kada je pokusni objekt čvrst i teži nekoliko tona.

Usprkos maloj masi udarnog mehanizma Dyna D i njegovoj maloj udarnoj energiji, u trenutku udara stvara se velika sila od oko 900 N (90 kgf) (za usporedbu, maksimalna

Metoda ispitivanja tvrdoće	Debljina stijenke u mm	Debljina stijenke u inčima
Odkok	20	0,79
UCI	2 – 3	0,08 – 0,12
TIV	10 x dubina prodiranja dijamanta	

Tablica 8:
Preporučene minimalne debljine stijenki. Povezivanjem na potporna pločicu učvršćuju se i stabiliziraju mali ispitni uzorci čime se omogućuje mjerenje malih debljina stijenki.

sila UCI sonde je 98 N/10 kgf). To je dovoljno da se proizvedu vibracije kod debljina stjenki ispod 20 mm. To može uzrokovati pogrešne vrijednosti tvrdoće i veliku količinu raspršenosti. U tim bi se slučajevima prednost radije trebalo dati UCI metodi, nego metodi odskoka.

Slika 25 pokazuje vrijednosti tvrdoće izmjerene standardnim Vickersovim ispitivanjem sa silom od 10 kgf (98 N) u odnosu na one izmjerene udarnim mehanizmom Dyna D.

Za debljine stjenki iznad 20 mm oba ispitivanja pokazuju iste rezultate. Za debljine ispod 20 mm, Vickersove vrijednosti izmjerene metodom odskoka niže su od stvarnih vrijednosti što rezultira otklonom od vodoravnog pravca.

6.7 Kvaliteta površine

Sve metode ispitivanja tvrdoće zahtijevaju glatke površine očišćene od oksida, boje, maziva, ulja, plastičnih premaza za zaštitu od korozije ili metalnih premaza za bolju vodljivost. Dubina otiska treba biti velika u usporedbi s hrapavošću površine.

Ako je potrebna priprema površine, mora se paziti da se pregrijavanjem ili očvršćenjem uslijed deformacije ne promijeni tvrdoća površine.

Praktičniji rezultati postižu se korištenjem ručne baterijske brusilice velike brzine (>12000 rpm), primjerice MIC 1060. Za ugađivanje površine koristite zrno 180. Postupak traje samo 10 sekundi.

6.8 Rukovanje, poravnavanje i učvršćivanje

MIC sondu postavite na malu i stalnu brzinu. Sonda treba biti pod pravim kutom u odnosu na površinu. Maksimalno kutno odstupanje od okomice treba biti manje od 5 stupnjeva. Nemojte okretati ni bušiti. Na dijamant ne smiju djelovati lateralne sile.

Udarne mehanizam mora biti unutar jednog do dva stupnja od okomice na površinu.

Nastavci u obliku potpornih prstena za udarne mehanizme i uložak za UCI sondu osiguravaju ispravno poravnavanje.

Standardni potporni prsteni koji se isporučuju s Dyna D i Dyna E sondama koriste se za ispitivanje konveksnih ili konkavnih radijusa većih od 30 mm. Veći promjer Dyna G standardnog potpornog prstena zahtijeva radijus veći od 50 mm. Dostupni potporni prsteni za Dyna D i Dyna E udarne mehanizme dostupni pokrivaju raspon od

r=10-30 mm za ispitivanje unutarnjih i vanjskih promjera cilindričnih i sferičnih oblika (v. Dyna 41 i Dyna 42). Po mjeri izrađeni potporni prsteni dostupni su na zahtjev.

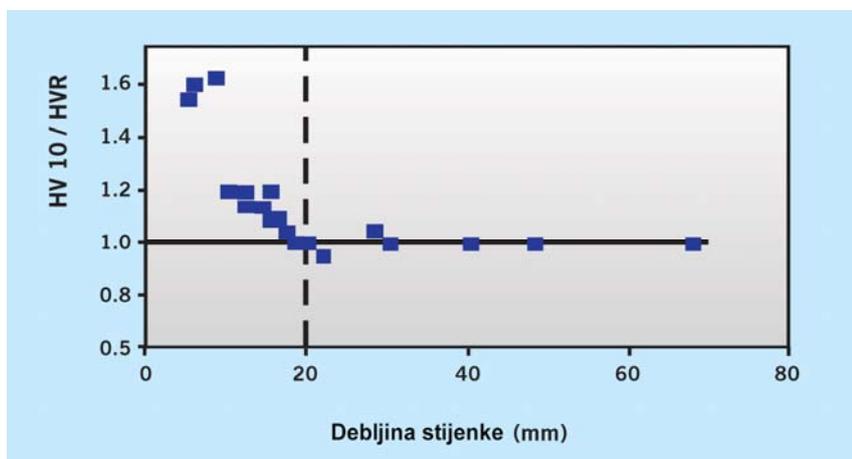
Za standardne duljine UCI sondi držači MIC 270 i MIC 271 dolaze kao pribor. Držač sonde MIC 271 preporučuje se za ispitivanje cilindričnih dijelova s radijusom od 3 do 75 mm. Ravni držač sonde osmišljen je za ispitivanje ravnih površina, ali je također koristan pri ispitivanju radijusa većih od 75 mm.

Namjestite TIV sondu okomito na ispitni uzorak. Dostupni su nastavci za sonde za ravne i zaobljene površine. Opterećenje postavite na malu i stalnu brzinu. Na zaslonu možete promatrati kako otisak „raste“. Otisak se automatski ocjenjuje prilikom primjene opterećenja.

6.9 Kalibriranje

Modul elastičnosti (ili Youngov modul) svojstvo je materijala kojim on može utjecati na kalibriranje instrumenta. Ispravno kalibriranje nužno je za točnost rezultata.

Za umjeravanje instrumenata Dyna-MIC ili MIC 20 za ispitivanje tvrdoće odskokom, operater prvo mora odabrati jednu od devet skupina materijala (v. Tablica 9). Odabir adekvatnog materijala omogućuje grubo kalibriranje, a vrsta udarnog mehanizma spojenog na instrument određuje dostupne pretvorbe. Preciznija kalibracija za konkretne materijale moguća je ako se za kalibriranje instrumenta koriste uzorci poznate tvrdoće. Za izvođenje kalibracije uzima se nekoliko očitavanja na uzorku, a prikazana prosječna vrijednost podešava se na stvarnu tvrdoću. Time se postiže precizna kalibracija te se dobiva očitana vrijednost za konkretni materijal koja se može koristiti za ponovno umjeravanje instrumenta.

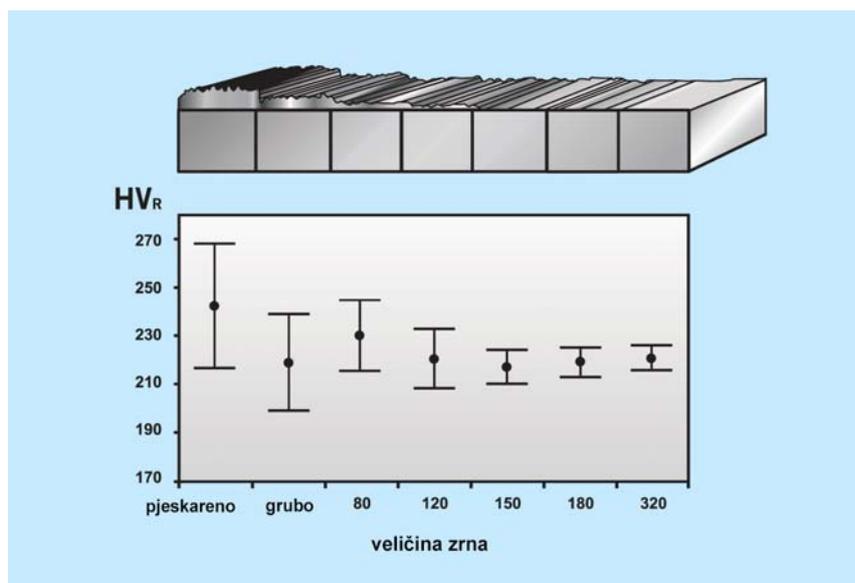


Slika 25: Standardne Vickersove vrijednosti (HV10) u usporedbi s Vickersovim vrijednostima na principu odskoka (HVR) za različite debljine stjenki cijevi.

UCI sonde kompatibilne s MIC10 i MIC20 serijama kalibrirane su prema etalonskim pločicama za čelik s modulom elastičnosti ili Youngovim modulom od 210000 MPa. Budući da nelegirani ili slabo legirani čelici imaju slični Youngov modul, standardnom se kalibracijom dobivaju točni rezultati. U većini slučajeva razlika modula elastičnosti srednje i visoko legiranih čelika toliko je beznačajna da pogreška potpada u dozvoljenu toleranciju za dijelove.

Međutim, modul elastičnosti za neželjezne materijale zahtijeva posebno kalibriranje. Za kalibriranje se uzima nekoliko očitavanja na ispitnom uzorku poznate tvrdoće. Prikazana prosječna vrijednost se zatim podešava prema stvarnoj vrijednosti. Time se kalibrira instrument, a usput se i ustanovljuje vrijednost za konkretni materijal koja se može koristiti za ponovno kalibriranje instrumenta.

Očitane vrijednosti umjeravanja polaze od tvornički postavljene vri-



Slika 26: Raspon izmjerenih vrijednosti tvrdoće naspram pripreme površine. HVR označuje pretvorene vrijednosti tvrdoće po Vickersu mjerene metodom odskoka.

jednosti za čelik. Napominjemo da to može biti pozitivna ili negativna vrijednost. Tablica 10 sadrži popis približnih vrijednosti za kalibriranje koje se mogu uzeti za neke uobičajene materijale.

Budući da se TIV metoda zasniva na Vickersovom ispitivanju, nema potrebe za kalibriranjem pri mjerenju na različitim materijalima. Za više informacija pogledajte Poglavlje 4.

Skupina materijala	HV	HB	HRB	HRC	HS	N/mm ²
1 Čelik - nelegirani, slabo legirani ili lijevani		D, E, G				
2 Alatni čelik	D, E			D, E		
3 Nehrđajući čelik	D	D	D	D		
4 Sivo lijevano željezo		D, G				
5 Nodularni lijev		D, G				
6 Lijevani aluminij		D	D			
7 Mjed		D	D			
8 Bronca		D				
9 Bakar		D				

Tablica 9: Skupine materijala i dostupne pretvorbe.

6.10 Provjera radnih svojstava instrumenta

Radna svojstva tvrdomjera periodički se provjeravaju pomoću standardiziranih etalonskih pločica.

Besprijekorno funkcioniranje mjerača tvrdoće na principu odskoka (DynaPOCKET, DynaMIC i MIC 20) temelji se na pet pojedinačnih mjerenja na certificiranoj Leebovoj etalonskoj pločici. Prosjek tih pet mjerenja trebao bi biti u okviru ± 5 HL certificirane vrijednosti u etalonskoj pločici. MICD62 etalonska pločica tvrdoće ima nominalnu vrijednost od oko 765 HL. Ako se te vrijednosti pretvore u HRC vrijednosti, rezultat je tvrdoća od 55 HRC s tolerancijom od ± 5 HRC.

Točnost UCI i TIV tvrdomjera (MIC 10, MIC 20 i TIV) temelji se na mjerenjima pomoću etalonskih pločica za tvrdoću po Vickersu. Prosjek pet očitavanja trebao bi biti u

Materijal	Vrijednost kalibriranja
Aluminij	- 8800
Krom	+ 0250
Bakar	- 5800
Lijevano željezo	- 4800
Titan	- 6500
Austenitni nehrđajući čelik	- 1500
Feritni i martenzitni nehrđajući čelik	- 0900

Tablica 10:
Približne vrijednosti UCI kalibriranja.

okviru $\pm 3,6\%$ certificirane vrijednosti u etalonskoj pločici pri upotrebi čvrstog/stabilnog potpornja ili nosača kao što je MIC222. Kada se ispituje ručno, potrebno je izraču-

nati prosječnu vrijednost najmanje 10 očitavanja s tolerancijom od $\pm 5\%$. Gornje tolerancije za različite metode ispitivanja sažete su u tablici 11.

Metoda	Mjerne tolerancije
Odskok	± 5 HL odstupanja od prosjeka od vrijednosti iz etalonske pločice s tri do pet očitavanja.
UCI	$\pm 3,6\%$ odstupanja od prosjeka od vrijednosti iz etalonske pločice s tri do pet očitavanja uz upotrebu potpornja MIC 222-A. Veća odstupanja moguća su kod ručnog mjerenja.
TIV	$\pm 3,6\%$ odstupanja od prosjeka od vrijednosti iz etalonske pločice s tri do pet očitavanja.

Tablica 11:
Mjerne tolerancije za različite metode ispitivanja.

7. Sažetak i pomoć pri odabiru prikladne metode ispitivanja

Proizvodna lepeza Krautkramerovih prijenosnih tvrdomjera obuhvaća serije instrumenata DynaPOCKET, DynaMIC, MIC 10, MIC 20 i TIV. U tim se instrumentima koriste tri različite fizikalne metode mjerenja -

UCI, metodu odskoka i optičku TIV metodu. Uvijek je potrebno odabrati adekvatnu opremu za željenu primjenu, odnosno metodu te odgovarajući instrument.

Sljedeće poglavlje daje vam kratak pregled različitih metoda ispitivanja i uobičajenih primjena, uz istovremenu pomoć pri odabiru prave opreme za vaše potrebe ispitivanja tvrdoće.

7.1 UCI metoda (MIC 20 / MIC 10)

Pri UCI metodi veličina otiska ispitivanja ne mjeri se optički, nego se područje otiska otkriva elektronički tako da se utvrđuje pomak frekvencije ultrazvuka pod opterećenjem.

Kod „mekih“ materijala Vickersov dijament prodire dublje u materijal, ostavljajući relativno veliko područje otiska što dovodi do velikog pomaka frekvencije.

To je tajna UCI metode ispitivanja tvrdoće: Pomak frekvencije proporcionalan je veličini otiska koji je proizveo Vickersov dijament.

UCI instrumenti jednostavno se kalibriraju na različite pokusne materijale.

Uobičajene primjene:

Toplinski obrađeni ili prekaljeni mehanički dijelovi (npr. bregaste osovine), ispitivanje zavarenih spojeva (ZUT), gotovi precizni dijelovi, zupčanici, staze kugličnih ležajeva, zupčanici, turbinske lopatice, tanki slojevi, npr. bakra ili kroma na čeličnim cilindrima, cilindri za roto-gravure, premazi.

Instrumenti:

MIC 10, MIC 10 DL, MIC 20, MIC 20 TFT

Sonde:

Ručne sonde

- 10 N / 1 kgf (MIC 201-A, MIC 201-AL)
- 50 N / 5 kgf (MIC 205-A, MIC 205-AL)
- 98 N / 10 kgf (MIC 2010-A)

Motorne sonde

- 8,6 N / 0,9 kgf (MIC 211-A)
- 3 N / 0,3 kgf (MIC 2103-A)
- 1 N / 0,1 kgf (MIC 2101-A)

7.2 Metoda odskoka (MIC 20 / DynaMIC / DynaPOCKET)

U metodi odskoka udarno tijelo ubrzava pri definiranoj brzini i udara o površinu ispitnog objekta. Uslijed plastične deformacije površine do koje dolazi u trenutku udara, udarno tijelo gubi na izvornoj energiji ili brzini.

Kod mekih materijala ispitni otisak koji je proizvelo udarno tijelo relativno je velik, t.j. udarno tijelo najviše gubi na izvornoj brzini i vraća se odgovarajuće umanjenom brzinom. Brzine prije i nakon udara mjere se bezkontaktnim načinom. Trajni magnet u udarnom tijelu generira inducirani napon pri prolasku kroz zavojnicu pri čemu je napon proporcionalan brzini. Povratna brzina, s druge strane, je mjera za tvrdoću ispitnog materijala.

Samo se instrumenti tvrtke Krautkramer mogu koristiti u bilo kojem smjeru bez dodatnih podešavanja (patentirana neizravna funkcija).

U tvrdomjeru je već pohranjeno devet različitih skupina materijala pomoću metode odskoka. Povrh toga, DynaMIC i MIC 20 mogu se jednostavno kalibrirati za druge ispitne materijale.

Uobičajene primjene:

Za velike, grubozrnate komponente s valjkastim površinama, jedinice motora ili mehaničke dijelove od lijevanog čelika ili lijevanih legura aluminijska, otkivke s nehomogenom površinskom strukturom, razlikovanje materijala i kovane legure bakra.

Instrumenti:

DynaPOCKET, DynMIC, DynaMIC DL, MIC 20, MIC 20 TFT

Udarni mehanizmi:

- Dyna D dia. 3 mm Volfram-karbidna kuglica
- Dyna G dia. 5 mm Volfram-karbidna kuglica
- Dyna E s dijamentnim vrhom

7.3. Optička metoda - TIV

Pri TIV metodi (gledanja kroz penetrator) veličina otiska Vickersovog dijamenta, t.j. duljine dijagonala, automatski se mjere pod opterećenjem gledanjem kroz dijament uz pomoć optičkog sustava koji koristi CCD kameru.

TIV mjerenjem duljina dijagonala automatski se izračunava i vrijednost tvrdoće po Vickersu za primijenjeno ispitno opterećenje.

Slika otiska „uživo“ na LCD zaslonu instrumenta također omogućuje trenutačnu provjeru pouzdanosti mjerenja, t.j. provjeru kvalitete prikazanog otiska koji je proizveo Vickersov dijament.

Mogućnošću gledanja kroz penetrator TIV metoda omogućuje ispitivanje tvrdoće svih materijala bez potrebe za dodatnim kalibriranjem. Pomoću ovog prijenosnog instrumenta više čak ni ispitivanja tankih materijala, poput zavojnica i tankih metalnih limova, ne predstavljaju problem.

Uobičajene primjene:

U radionicama za očvršćivanje i tvrtkama za toplinsku obradu (različiti materijali bez kalibriranja), zrakoplovnoj industriji (komponente tankih stijenki, različite legure), za metalne limove (za opruge) itd.

Instrumenti:

TIV

Sonde:

TIV 101 (10 N / 1 kgf)
TIV 105 (50 N / 5 kgf)

7.4 Osnovna pitanja za korisnika

1. Što želite mjeriti?

	Dyna-POCKET	DynaMIC	MIC 10	MIC 20	TIV
Premazi	Ne	Ne	Da	Da	Da
Očvršćene površine	Ne	Ne	Da	Da	Da
Zavareni spojevi (ZUT)	Ne	Ne	Da	Da	Da
Različiti materijali (*s kalibriranjem)	Da*	Da*	Da*	Da*	Da
Odljevci/otkivci	Da	Da	Djelomice	Da	Djelomice
Cijevi	Djelomice	Djelomice	Da	Da	Djelomice
Metalni limovi, opruge	Ne	Ne	Djelomice	Djelomice	Da

2. Koji materijal?

	Dyna-POCKET	DynaMIC	MIC 10	MIC 20	TIV
Čelik (legure, nehrđajući...)	Da	Da	Da	Da	Da
Drugi metali (Al, Cu ...)	Da	Da	Da	Da	Da
Lijevani čelik	Da	Da	Djelomice	Da	Djelomice
Lijevani aluminij	Djelomice	Da	Djelomice	Da	Djelomice
Keramika	Ne	Ne	Djelomice	Djelomice	Da
Staklo	Ne	Ne	Ne	Ne	Da
Plastika	Djelomice	Djelomice	Djelomice	Djelomice	Da

3. Postoje li posebni zahtjevi?

	Dyna-POCKET	DynaMIC	MIC 10	MIC 20	TIV
Pohrana podataka/ Računalno sučelje	Ne	Samo DL	Samo DL	Da	Da
Statistička evaluacija	Ne	Da	Da	Da	Da
Pretvorbe skala	Da	Da	Da	Da	Da
Neusmjerenost (*osim motorne sonde)	Da	Da	Da*	Da*	Da
Debljina stijenke <20 mm (*s povezivanjem)	Djelomice*	Djelomice*	Djelomice	Djelomice	Da
Masa <2 kg (*s povezivanjem)	Djelomice*	Djelomice*	Djelomice	Djelomice	Da

Ovisno o zadatku, za ispitivanje tvrdoće koristi se bilo UCI metoda, metoda odskoka ili optička TIV metoda.

Prikladna metoda ne može se uvijek isprve jasno odrediti. Iskusni inženjer je stoga najbolja osoba koja može donijeti ispravnu odluku na

temelju pojedinog ispitnog objekta na licu mjesta.

