

**PRIMENA SAVREMENIH TEHNOLOGIJA U OBLASTI
ISPITIVANJA METALA RAZARANJEM**

**APPLICATION OF MODERN TECHNOLOGIES IN THE
DESTRUCTIVE METAL MATERIALS TESTING**

ZIJAH BURZIĆ

Vojnotehnički institut, Katanićeva 15, Beograd, SCG, zburzic@eunet.yu

IZVOD

U radu je dat kratak prikaz opreme za ispitivanje metala, sa naglaskom na prikazu savremene kompjuterski i softverski podržane opreme. Značaj ispitivanja metala i konstrukcija za razvoj tehnike i današnja dostignuća na polju gradnje aviona, automobila, železnica, brodova, turbina, mlaznih motora, svemirskih letilica itd. svakako je izvanredno veliki. Kako je ova tematika izuzetno obimna, u ovom radu je dat pregled opreme za ispitivanje sa razaranjem. Akcenat je stavljen na deo opreme koja se najviše koristi, a to su ekstenzometri, univerzalne mašine za ispitivanje metala i uređaj za udarna ispitivanja.

Ključne reči: ispitivanje metala, metode, softver, hardver

ABSTRACT

A review of the computerized equipment for metal testing is presented in the paper. Importance of the metal and structure testing on the technology development and production of the airplanes, automobiles, rails, ships and space technology, is well known. This subject matter is very wide and in the paper is given review of the most frequently used equipment for destructive material testing, as extensometers, universal testing machines for metals and impact testing machines.

Key words: metal testing, methods, software, hardware

UVOD

Način i postupak dobijanja metala ljudima je odavno poznat. Međutim, tek krajem devetnaestog veka se detaljnije saznalo da se svojstva metala osetno mogu menjati nekim postupcima prerade (zagrevanjem pa kovanjem, valjanjem i sl.). Od tada se postepeno počelo sa sistematskim istraživanjem osobina metala, odnosno legura, pa se vremenom razvila nova grana nauke fizička metalurgija. Njen zadatak je da ispituje fizičko-hemijska, posebno strukturna i mehanička svojstva metala i legura, i da unapređuje metode njihovog istraživanja. Prema postavkama fizičke metalurgije, fizičko-hemijska i mehanička svojstva metala, odnosno legura određena su prirodom atoma i njihovim međusobnim raspo-

redom u prostoru. Međutim, zbog postojanja grešaka u metalnoj strukturi, svojstva metala izračunata na osnovu poznavanja karakteristika atoma i njihovih agregata ne slažu se sa vrednostima dobijenim neposrednim merenjem. Prema tome, teorijske postavke fizičke metalurgije, uticaji grešaka u metalnoj strukturi, odnosno stvarna svojstva metala mogu se pouzdano proveriti i utvrditi jedino neposrednim ispitivanjima i merenjima [1].

Vremenom se razvio čitav niz postupaka ispitivanja kojima je cilj da se svojstva metala što bolje upoznaju i tako što racionalnije iskoriste. Sve veći broj raznovrsnih materijala u primeni i sve oštriji zahtevi u pogledu kvaliteta nametnuli su potrebu da se izvrši standardizacija i propišu osnovna svojstva raznih vrsta materijala, a samim tim i standardizacija postupaka ispitivanja. Ispitivanje materijala ne vrši se samo radi utvrđivanja svojstava prilikom proizvodnje, ili prijema, već vrlo često i radi raznih ekspertiza u svrhu utvrđivanja načina upotrebe i odgovornosti koja nastaje usled neželjene upotrebe. U razvojnim centrima većih industrijskih preduzeća i naučno-istraživačkim institutima ispitivanja se vrše u cilju što potpunijeg upoznavanja svojstava metala, kao i u cilju poboljšanja tih svojstava kako bi se dobili materijali za nove proizvode, odnosno nova područja primene. Značaj ispitivanja metala za razvoj tehnike i današnja dostignuća na polju gradnje aviona, automobila, železnica, brodova, turbina, mlaznih motora, svemirskih letilica itd. svakako je izvanredno veliki. Danas, praktično, nije moguće zamisliti ni jednu ozbiljnu naučno-istraživačku organizaciju iz oblasti ispitivanja metala i metalnih konstrukcija, preduzeće koje se bavi preradom metala, odnosno izradom metalnih proizvoda bez sopstvene laboratorije sa opremom za različite vrste ispitivanja. U zavisnosti da li prilikom ispitivanja dolazi do razaranja metala ili ne, razlikujemo dve osnovne grupe ispitivanja:

- Ispitivanja sa razaranjem i
- Ispitivanja bez razaranja (NDT ispitivanja).

Kako je ova tematika izuzetno obimna, u ovom radu je dat pregled opreme za ispitivanje razaranjem. Akcenat je stavljen na deo opreme koja se najviše koristi, a to su ekstenzometri, univerzalne mašine za ispitivanje metala i uređaji za udarna ispitivanja, čime se ne umanjuje značaj ostale opreme. Obzirom na način dejstva sile, vrstu naprezanja i uslove pri kojima se ova svojstva određuju može se načiniti više podela mehaničkih ispitivanja.

Prema načinu dejstva sile razlikuju se **statička i dinamička ispitivanja**. Pod statičkim ispitivanjima podrazumevaju se ona koja se obavljaju pri mirnom dejstvu sile tako da napon postepeno raste, obično ne brže od 10 MPa u sekundi. Kod dinamičkog ispitivanja sila deluje udarom ili se učestano menja po određenom zakonu. Broj promena opterećenja obično se kreće u granicama od 3 do 20.000 u minutu [2]. S obzirom na vrstu naprezanja razlikuju se **ispitivanja zatezanjem, pritiskom, savijanjem, uvijanjem, smicanjem** itd. uz mogućnost njihovog kombinovanja. Sva ova ispitivanja mogu se vršiti pri statičkom ili dinamičkom dejstvu sile tako da je moguće ostvariti dosta veliki broj raznih kombinacija. Mehanička ispitivanja najčešće se vrše na sobnoj temperaturi, ali isto tako i na niskim, odnosno povišenim temperaturama. Posebnu grupu čine

tzv. *tehnološka ispitivanja*. Za razliku od mehaničkih ispitivanja pri kojima se određuju svojstva otpornosti, kod tehnoloških ispitivanja vrednosti dejstvujućih sila nisu od interesa već se isključivo posmatra način deformisanja, odnosno oštećenja usled dejstva spoljnih sila.

MERENJA DEFORMACIJA

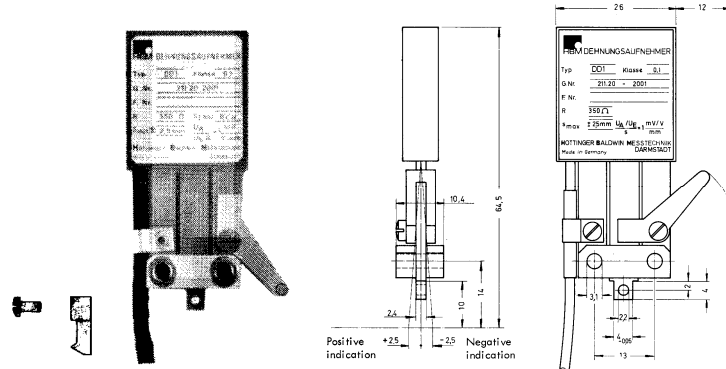
Deformacija je fundamentalni inženjerski fenomen. Ona postoji u svakoj konstrukciji zbog spoljašnjih opterećenja ili zbog težine same konstrukcije. Deformacije mogu biti elastične ili plastične u zavisnosti od intenziteta sile kao i vremena dejstva sile na konstrukciju. Zbog izuzetnog značaja utvrđivanja promena na materijalu pod dejstvom opterećenja, uloženi su veliki naponi u stvaranju univerzalnog metoda za merenje deformacija [3]. Pokušaji u merenju deformacija obuhvatili su upotrebu mehaničkog mikrometra za merenje ukupne promene dužine tela pod opterećenjem. Ovaj način merenja daje srednju dužinu u bazi, ali ne daje nikakvu indikaciju o tome kakva može biti deformacija u okolini diskontinuiteta. Sledeći korak u razvoju uređaja za merenje deformacija doneo je seriju instrumenata nazvanih ekstenzometrima. Deformacije koje nastaju u materijalu, pri naponima u području elastičnosti, toliko su male da se mogu detektovati jedino ako se upotrebi neki sistem za njihovo povećanje. Za tu svrhu koriste se instrumenti - tenzometri koji mogu biti konstruisani na:

- mehaničkom,
- optičkom, ili
- električnom principu.

Tenzometri se koriste za merenje deformacija ne samo na epruvetama već i na gotovim mašinskim ili građevinskim konstrukcijama. Cilj ispitivanja gotovih konstrukcija obično se svodi na to da se, koristeći se postavkama elementarne nauke o čvrstoći, odnosno analitičkim vezama između napona i deformacija, odrede maksimalni naponi u pojedinim delovima konstrukcije [4].

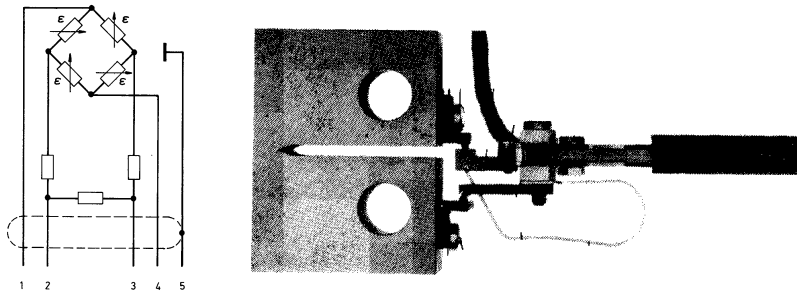
Dok su se mehanički i optički ekstenzometri usavršavali, drugi istraživači su se bavili električnim fenomenom kao oruđem za merenje deformacija. Električne merne trake su instrumenti tako konstruisani da se svaka deformacija tela na kojem su postavljene odražava proporcionalnom promenom električnih karakteristika trake. Obično su upotrebljene električne promenjive, otpornost, induktivnost i kapacitativnost. Na ovim osobinama razvijene su kapacitativne i induktivne kao piezoelektrične merne trake ali ne onim intenzitetom kao merne trake bazirane na električnoj otpornosti. Prema tome od električnih tenzometara najširu primenu imaju tzv. merne trake. Njihova primena, počela je oko 1940. god. i od tada se toliko proširila i usavršila da su praktično potisnuti u drugi plan svi ostali postupci merenja deformacija na gotovim konstrukcijama [5].

Pored svoje osnovne namene, merne trake su našle značajnu primenu kao »osetljivi element« u raznovrsnim instrumentima, čime je omogućeno da se mehaničke veličine jednostavno mere električnim putem. Najznačajniji instrumenti kod kojih se koristi merne trake su ekstenzometri. Izgled savremenog ekstenzometra koji deformacije registruje pomoću merne trake postavljene na pokretni nožić dat je na sl. 1 [6].

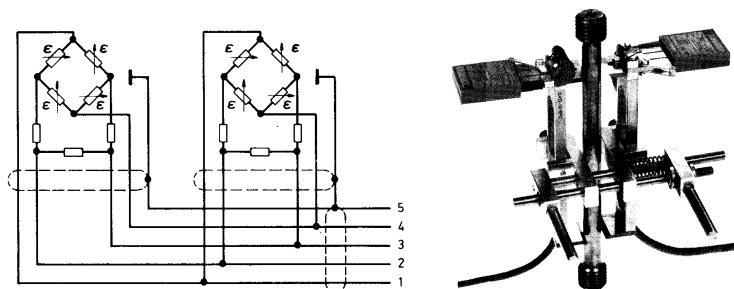


Slika 1. Izgled savremenog ekstenzometra HOTTINGER DDI
Figure 1. Modern extensometer HOTTINGER DDI

Današnji ekstenzometri se rade kao višenamenski, odnosno koriste se za merenje deformacija kod ispitivanja na zatezanje i pritisak, za merenje otvaranja vrha prsline (COD) kod ispitivanja mehanike loma itd. Mogu da se koriste pojedinačno ili u paru. Izgled sheme pojedinačnog ekstenzometra je dat na sl. 2, a sheme dvostrukog ekstenzometra je dat na sl. 3. Danas se još koriste ultrazvučni ekstenzometri, koji su najširu primenu našli kod ispitivanja metala koji imaju velika izduženja, kod ispitivanja na povišenim i niskim temperaturama.



Slika 2. Shema i izgled pojedinačnog ekstenzometra
Figure 2. Single extensometer



Slika 3. Shema i izgled ekstenzometra u paru
Figure 3. Paired extensometer

UNIVERZALNE MAŠINE ZA ISPITIVANJE METALA

Savremene mašine za ispitivanje metala u poslednje vreme su znatno usavršene, naročito u pogledu tačnosti pokazivanja i mogućnosti regulisanja brzine opterećivanja i brzine deformisanja. Ovo je omogućeno, uglavnom, primenom različitih elektronskih uređaja. Savremene konstrukcije ovih mašina treba da zadovolje sledeće zahteve [7]:

- da su što jednostavnije i što lakše, a pri tom dovoljno čvrste da se nijedan deo mašine tokom dejstva sile ne bi deformisao,
- da se opterećenje može prenositi na epruvetu, odnosno uzorak koji se ispituje željenom brzinom, i da se isto u svakom trenutku može očitati sa potrebnom tačnošću,
- da se opterećenje postiže mirno, bez udara i da se po potrebi može održavati za duže vreme konstantnim,
- da uređaj za pričvršćivanje bude jednostavan, lak za manipulisanje i da pri tom onemogućuje klizanje krajeva epruvete, odnosno uzorka koji se ispituje.

Iz gore navedenih zahteva je proisteklo da su današnji (savremeni) uređaji za ispitivanje metala tako koncipirani da u sebi sadrže sva savremena dostignuća iz raznih oblasti nauke i tehnike. Tu se pre svega misli na:

- primenu novih materijala za izradu delova mašine i pomoćnih pribora,
- primenu savremenih elektronskih komponenti za merenja i kontrolu procesa,
- primenu savremenih opteretnih ćelija i ekstenzometara konstruisanih na principu mernih traka, kao i primenu induktivnih davača pomeranja,
- primenu računara za kvalitetnu obradu rezultata merenja.



Slika 4 - Shema savremenog sistema za ispitivanje metala
Figure 4 - Scheme of the modern metal materials testing system

Shema savremenog sistema za ispitivanje metala je data na sl. 4 [8]. Savremene mašine za ispitivanje metala se danas dele na:

- elektro-mehaničke mašine za ispitivanje metala
- servo-hidraulične mašine za ispitivanje metala.

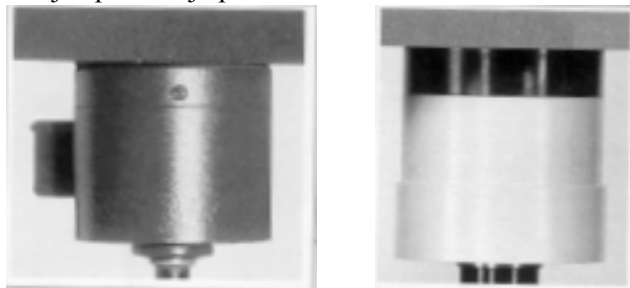
Daleko najrasprostranjenije su elektro-mehaničke univerzalne mašine za ispitivanje metala. Iz sheme date na sl. 4 vidljivo je da savremeni elektromehanički sistemi predstavljaju niz podсистema koji kao celina predstavljaju elektomehanički univerzalni sistem za ispitivanje metala. Modul 1 predstavlja sam ram mašine, koji mora da bude robustan i dobro zaštićen. Opterećenje se preko elektromotora i zavojnog vretena prenosi na uzorak. Kontrolna elektronika i sistem upravljanja i komandovanja mašinom (Modul 2) predstavlja deo mašine koji u poslednje vreme doživljava najviše inovacija i modifikacija. Njegova uloga je da obezbedi pravilno i lagano rukovanje mašinom, kao i da obezbedi registrovanje svih parametara ispitivanja (sile, deformacije, pomeranja, temperature, itd). Modul 3 je deo koji se odnosi na uređaje bez kojih se ne može zamisliti jedan savremeni sistem za ispitivanje metala. To su pre svega:

- silomeri (davači sile),
- razni tipovi ekstenzometara,
- induktivni davači.

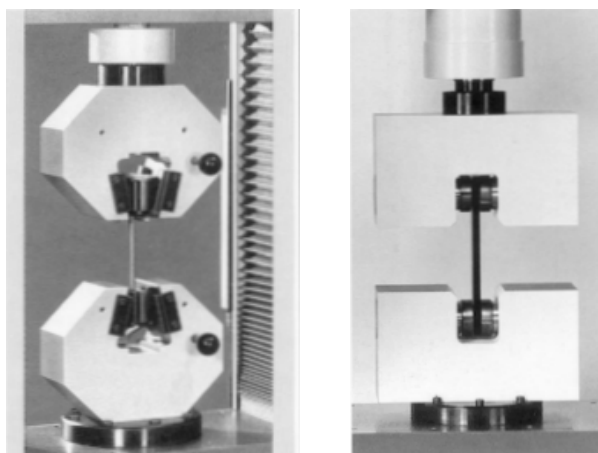
Silomeri (Davači sile) su uređaji za automatsko registrovanje opterećenja, i rade na principu mernih traka, odnosno punog Vinstonovog mosta. Izgled savremenih silomera je dat na sl. 5. Značajan elemenat savremenih uređaja za ispitivanje metala predstavljaju alati za prihvatanje epruveta za ispitivanje (Modul 4). Postoji čitav spektar alata koji se koristi za prihvatanje raznih tipova epruveta, a to su:

- mehaničke čeljusti za ravne i okrugle epruvete,
- hidraulične čeljusti za ravne i okrugle epruvete
- mehaničke čeljusti za ispitivanje na povišenim i niskim temperaturama,
- mehaničke čeljusti za savijanje u tri i četiri tačke, itd.

Postoji i čitav spektar različitih alata za prihvatanje epruveta od plastike, polimera, tekstila, kompozita, ali to nije predmet ovih izlaganja. Izgled savremenih alata za prihvatanje epruveta je prikazan na sl. 6.



Slika 5. Savremeni silomeri za zatezanje i pritisak
Figure 5. Modern load meters for tension and compression



Slika 6. Alati za prihvatanje metalnih epruveta
Figure 6. Tools for metal samples

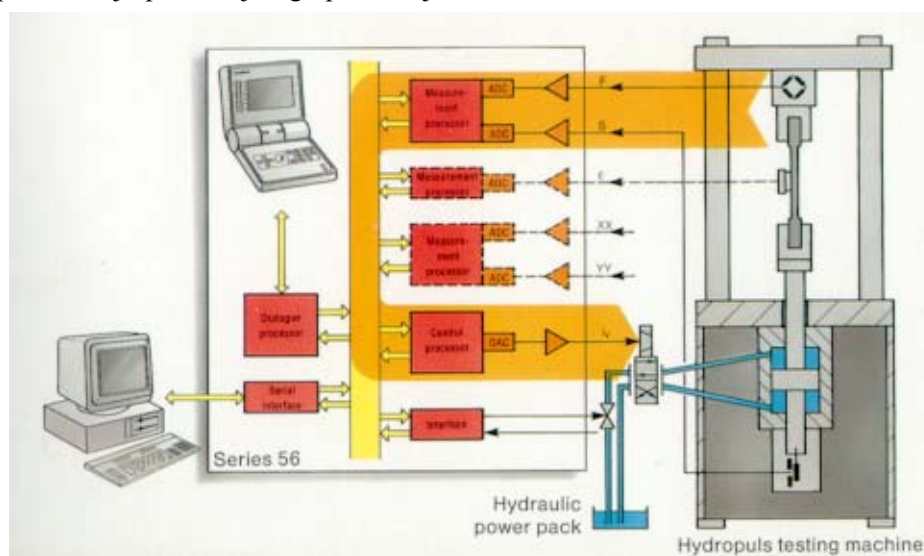
Danas, jedan od vrlo bitnih komponenti savremenog ispitivanja metala je softverska podrška, odnosno softverska aplikacija poznatih standarda za ispitivanje metalnih materijala (Modul 5). Naime, koristeći prednosti savremenog projektovanja, računari su našli značajnu primenu kod savremenih uređaja za ispitivanje metala. To je u mnogome olakšalo sam postupak ispitivanja, jer je samo komandovanje uređajem automatizovano i centralno rukovođeno. Međutim, najveći značaj primene računara je kod registrovanja parametara ispitivanja, njihove obrade i konačne prezentacije.

Savremene mašine za ispitivanje metala sadrže i čitav spektar pomoćnog alata i pribora, misleći pre svega na različite tipove alata za ispitivanje mehanike loma, niskocikličnog zamora kao i komora za ispitivanje na sniženim i povišenim temperaturama i sl.

Elektromehaničke mašine za ispitivanje metala se uglavnom koriste za statička ispitivanja gde opseg opterećenja ne prelazi 400 kN. Ovi sistemi se mogu koristiti i za kvazi dinamička ispitivanja, pre svega niskocikličnog zamora. Za opterećenja preko 400 kN koriste se bez izuzetka servo-hidraulične mašine, uglavnom zato što hidraulika omogućava relativno lako postizanje velikih opterećenja (sila). Servo-hidraulične mašine za ispitivanje metala pored statičkih ispitivanja gde opterećenja prelaze 400 kN služe i za dinamička ispitivanja, kao i za ispitivanja sa spektrom opterećenja. Shema savremenog servo-hidrauličnog sistema za ispitivanje metala je data na sl. 7 [9].

U celini posmatrano, mašine za ispitivanja promenljivim opterećenjem su mnogo složenije konstrukcije od mašina za statička ispitivanja. Greške u konstrukciji, ili nepreciznosti pri izradi mašina, mogle bi da prouzrokuju neravnomernu raspodelu napona, pa bi u takvim slučajevima prelom nastao uvek na istom mestu, tj. na mestu najveće koncentracije napona, što bi, razume se, bilo od uticaja i na rezultate ispitivanja.

Sa gledišta konstrukcije mašina, na rezultate ispitivanja nepovoljno bi moglo da utiče nedovoljno čvrst ram, neispravno postavljen temelj čiji je zadatak da prigušuje vibracije, kao i neprikladna konstrukcija uređaja za proizvodnju promenljivog opterećenja.



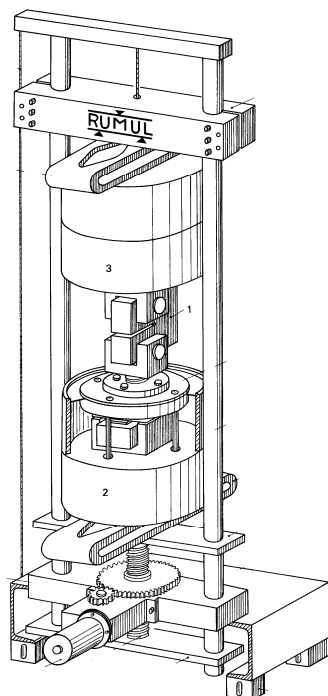
*Slika 7. Shema savremenog servo-hidrauličnog sistema za ispitivanje metala
Figure 7 - Scheme of the modern servo - hydraulic system for the metal material testing*

U zavisnosti od vrste napreznja koje mogu da ostvare, mašine za ispitivanje promenljivim opterećenjem mogu se podeliti na:

- mašine za ispitivanje promenljivim zateznim-pritisnim opterećenjem (pulzatori);
- mašine za ispitivanje promenljivim savojnim opterećenjem;
- mašine za ispitivanje promenljivim uvojnim opterećenjem;
- mašine za ispitivanje promenljivim kombinovanim (npr. savijanje-uvijanje) opterećenjem.

Svakako, najinteresantnije su mašine za ispitivanje promenljivim zateznim-pritisnim opterećenjem, ili popularnije rečeno pulzatori. Shema savremenog pulzatora je data na sl. 8.

Pulzatori spadaju u grupu rezonantnih mašina koji rade sa visokom frekvencijom, tzv. visokofrekventni pulzatori. Pobuđivanje opruge za opterećivanje postiže se elektromagnetski, naponom visoke frekvencije. Visokofrekventni pulzatori u velikoj meri skraćuju vreme ispitivanja, pošto rade sa frekvencijom i do 300Hz.



Slika 8. Shema visokofrekventnog pulzatora
Figure 8 - Scheme of the high frequency testing machine

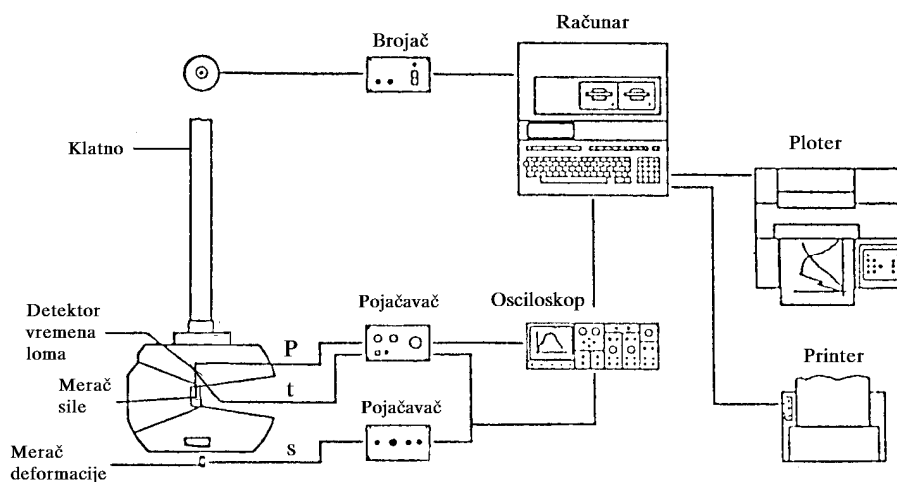
SAVIJANJE UDARNIM DEJSTVOM SILE

Veliki broj delova mašina i konstrukcija izložen je u toku rada udarnim napreznjima. Karakteristike materijala pri udarnim opterećenjima razlikuju se od karakteristika dobijenih statičkim dejstvom sile; stoga je razumljiva potreba za njihovim određivanjem. Ispitivanje savijanjem udarnim dejstvom sile na epruветama sa zarezom može da pruži i objašnjenje o ponašanju materijala pri ometanom deformisanju, tj. pri prostornom naponskom stanju [10]. Određivanje rada potrebnog za lom pod utvrđenim uslovima ispitivanja najčešće služi za tekuću kontrolu kvaliteta i homogenosti materijala, kao i njegove obrade. Ovim postupkom ispitivanja može se utvrditi sklonost ka krtom lomu, odnosno sklonost ka povećanju krtosti u toku eksploatacije (starenje).

Za ispitivanje savijanjem pri udarnom dejstvu sile na epruветama sa zarezom postoji nekoliko postupaka: Šarpi, Izo, Gijeri, Šnat [11]. Uslovi ispitivanja, kao i oblik i dimenzije epruветa kod navedenih postupaka se razlikuju, te se rezultati ispitivanja dobijeni različitim postupcima ne mogu upoređivati. Za određivanje ukupne energije udara najpoznatija je metoda po Šarpiju. Ispitivanje se obavlja udarom po epruветi sa U ili V zarezom. Epruветa sa zarezom na sredini položi se na nosač i oslanja se na dva oslonca. Ispitivanje se izvodi po-

moću klatna, koje na kraju ima teg u obliku noža. Klatno se izvede iz ravnotežnog položaja u radni položaj. Ispitivanje se sastoji u tome što se epruveta lomi jednim udarom klatna, pri čemu se postiže udar u pravcu zarez, ali sa suprotne strane. Zatim se meri utrošena energija kao razlika potencijalne energije klatna u radnom položaju i potencijalne energije nakon lomljenja epruvete. To je, u stvari, rad potreban za lomljenje uzorka ili udarna žilavost datog uzorka. Najčešće su dužina poluge klatna i masa tega takve da obezbeđuju energiju u maksimalnom opsegu od 300 J.

Pri ispitivanju savojnim udarnim opterećenjem energija loma određuje se kao integralna veličina. Tako određena energija loma ne daje mogućnost razdvajanja otpornosti materijala prema stvaranju, odnosno širenju prsline. Da bi se to postiglo udarna sila i vreme treba da budu kontinualno zapisivani tokom ispitivanja, što je moguće izvesti instrumentiranjem klatna. Shema savremenog instrumentiranog klatna je data na sl. 9.



Slika 9. Shematski prikaz savremenog instrumentiranja klatna [13]
Figure 9. Schema of the instrumented Charpy pendulum

Iz priložene sheme je vidljivo da instrumentiranje klatna obuhvata povezivanje merača sile, koji je instaliran u čekić klatna, detektora vremena loma i merača deformacije preko pojačavača sa osciloskopom. Kako je lom epruvete izazvan udarom kratkotrajna pojava (0,5 - 8 ms), to je uloga osciloskopa da registrovane signale učini vidljivim. Osciloskop se zatim povezuje sa računaram radi obrade dobijenih signala pri merenju. Praćenje promene sile sa vremenom omogućava da se sazna više o tome da li je utrošeni rad za lom uzorka posledica delovanja niske vrednosti sile na duže vreme, ili kratkotrajnog delovanja visoke vrednosti sile, što je bitno za ocenu ponašanja materijala.

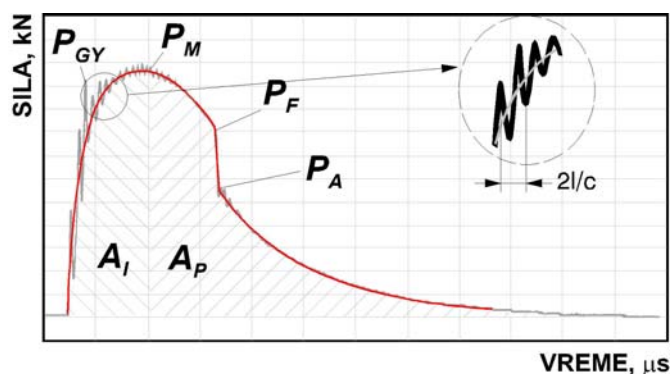
Ispitivanjem epruvete sa zarezom na instrumentiranom klatnu omogućeno je praćenje promene sile sa vremenom. Tako dobijen dijagram sile - vreme, sl. 10, omogućava određivanje sledećih podataka [12]:

P_{GY} - dinamička sila napona tečenja; određuje se na mestu zakrivljenja dijagrama, tj. na prelaznoj tački od linearne ka nelinearnoj zavisnosti sile-vreme. Ona služi u prvoj aproksimaciji kao mera plastičnog popuštanja ligamenta uzorka.

P_M - maksimalna sila na krivoj sile - vreme.

P_F - sila početka nestabilnog rasta prsline; određuje se kao sila na preseku glatke krive i strmo padajućeg dela krive sile-vreme.

P_A - sila pri kojoj se zaustavlja brzi rast prsline.



Slika 10. Tipičan dijagram sile-vreme za izraženo plastično ponašanje materijala, dobijen na instrumentiranom klatnu [14]

Figure 10. Diagram of the load - time for an instrumented Charpy test [14]

Kada se strmi pad sile podudara sa maksimalnom silom, onda je $P_M = P_F$. Sila P_A se određuje kao presek strmog pada krive sile - vreme i glatke krive koja osciluje.

Definisane sile na sl. 10 odgovaraju deformacijama koja nose iste indekse kao ove sile. Dodatno se definiše deformacija S_T na kraju krive sile - deformacija.

S_{GY} - deformacija na početku plastičnog loma ligamenta.

S_M - deformacija pri maksimalnoj sili.

S_F - deformacija pri inicijaciji nestabilnog rasta prsline.

S_A - deformacija na kraju nestabilnog rasta prsline.

S_T - deformacija na kraju krive sile - deformacija, pri čemu je kraj ove sile definisan kao $0,02 P_M$.

Iz dijagrama sile - vreme, sl. 10, moguće je izračunati energiju A , potrebnu za lom uzorka:

$$A = \int_0^{t_1} P(t) \cdot v(t) \cdot dt \quad (1)$$

gde je:

- P(t) - sila, koja se menja sa vremenom;
- v(t) - promena brzine klatna za vreme loma;
- t - vreme trajanja loma.

Da bi se povećala sposobnost prikaza energije udara, ova se mora rastaviti na sastavne komponente, silu i deformaciju (ugib epruvete). Ugib se određuje iz zavisnosti sila-vreme. Veza između sile i vremena je proporcionalna karakteristikama ubrzanja. Koristi se kruti teg mase m, početne brzine udara v_0 , a deformacije počinju u trenutku vremena t_0 . Ugib se proračunava dvostrukom integracijom.

$$s(t) = \int_{t_0}^t v(t) dt \quad (2)$$

$$v(t) = v_0 + \frac{1}{m} \int_{t_0}^t P(t) dt \quad (3)$$

Za celovitiju ocenu ponašanja materijala pri udarnom opterećenju potrebno je znati koji se deo energije troši za stvaranje prsline, a koji deo za širenje prsline. Postoji više metoda kojima se može razdvojiti ukupna energija udara, A_{uk} , na energiju za stvaranje prsline, A_I , i energiju za širenje prsline, A_P . Većina njih se zasniva na tome da energija za stvaranje prsline ne zavisi od radijusa zareza, već da radijus utiče na energiju za širenje prsline [12].

Najprihvatljiviji postupak određivanja energije širenja prsline je preko "zamorne prsline". Suština ovog postupka je u tome da se na epruvetama sa "V" zarezom izaziva zamorna prslina, pa se takva epruveta lomi na Šarpi klatnu i energija koja se pri tom utroši za lom je praktično energija širenja prsline, A_P . Ukoliko je poznata vrednost ukupne energije udara ispitivanog materijala onda može da se izračuna deo energije potrebne za stvaranje prsline, A_I :

$$A_I = A_{uk} - A_P \quad (4)$$

Određivanje energije stvaranja i energije širenja prsline po ovoj metodi obavlja se na jednom uzorku (za razliku od drugih postupaka), što daje veću tačnost. Na dijagramu sila - vreme, sl. 10, obeležene su površine A_I i A_P koje su proporcionalne energijama stvaranja i širenja prsline. Treba napomenuti da se iz dijagrama sila - vreme mogu odrediti i sila na granici tečenja, maksimalna sila i

sila krtog loma, kao što je to prikazano na sl. 10. Međutim, treba uzeti u obzir da se u ispitivanju ne iskazuju uvek sve ove sile.

Dva materijala koja imaju jednake vrednosti ukupne energije loma udarom, mogu da imaju različite energije stvaranja i širenja prsline. S tačke gledišta sigurnosti konstrukcije bolji je onaj materijal koji ima malu energiju stvaranja prsline, a veliku energiju širenja prsline. U zavisnosti od vrste ispitivanog materijala, temperature ispitivanja, režima termičke obrade, ispitivanjem na instrumentiranom klatnu mogu da se dobiju različiti tipovi zavisnosti sila - vreme, odnosno sila - ugib [12].

ZAKLJUČAK

Savremena oprema za ispitivanje metala je danas neizostavan segment ocene kvaliteta materijala, kao i ocene njihovih mehaničkih i eksploatacijskih svojstava. Njen značaj za razvoj tehnike i današnja dostignuća na polju gradnje aviona, automobila, železnica, brodova, turbina, mlaznih motora, svemirskih letilica itd. je izuzetno veliki. Danas, praktično, nije moguće zamisliti ni jednu ozbiljnu naučno-istraživačku organizaciju iz oblasti ispitivanja metala i metalnih konstrukcija, preduzeće koje se bavi preradom metala, odnosno izradom metalnih proizvoda bez sopstvene laboratorije sa opremom za različite vrste ispitivanja.

Osnovni napredak u razvoju nove opreme se ogleda u primeni novih savremenih sistema za prikupljanje i obradu rezultata ispitivanja, kao i potpunu automatizaciju procesa rada. Primena novih opteretnih ćelija, kao i ekstenzometara dovela je do toga da je danas teško moguće zamisliti neko ispitivanje koje se ne može realizovati u gotovo identičnim eksploatacijskim uslovima.

LITERATURA

- [1] Dieter, G.E., Mechanical Metallurgy, Tokyo, Japan, 1994.
- [2] Bailey, F.W.J., Fundamentals of Engineering Metallurgy, Cassell London, 1991.
- [3] Balyaev, N.M., Strength of Materials, Nauka, Moskva, 1972.
- [4] Makarov, R.A. Tenzometrija v Masinostroenii, Moskva, 1975.
- [5] Kljuev, V.V. Ispitaljnaja tehnika I, Moskva Masinostroenije, 1982.

- [6] Kljuev, V.V. Ispitaljnaja tehnika II, Moskva Masinostroenije, 1984.
- [7] Bardenheier R. Aktuell Prufverfahren zur charakterisierung des mechanisch - dynamischen verhaltens, Darmstadt, 1987.
- [8] Electromechanical Universal Testing Machines RSA SCHENCK TREBEL TESTING, Karl Schenck, Darmstadt 1, 1997.
- [9] AWS B4.0M:2000, "Standard Methods for Mechanical Testing of Welds", American National Standards Institutr (ANSI), July 25, 2000.
- [10] ASTM E23-86: Standard Method for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials, Annual Book of ASTM Standards 1986, Vol. 03. 01, p. 229.
- [11] Terzić, P., Ispitivanje metala, IMS Institut, 1982.
- [12] Burzić, M., Magistarski rad, Tehnološko-metalurški fakultet Beograd, 2000.