



**UNIVERZITET U ZENICI  
MAŠINSKI FAKULTET**



# **DINAMIČKO ISPITIVANJE MATERIJALA**

**GUTLIĆ KEMAL**

**Katedra za metalne materijale  
Mentor : v. prof. dr. Nađija Haračić  
Akademska godina 2007/2008**

## Apstrakt

Značaj ispitivanja metala za razvoj tehnike te današnja dostignuća na polju gradnje automobila, željeznica svemirskih letjelica, brodova, turbina, itd. je izvanredno veliki.

Veoma rasprostranjena primjena metala kao građevinskih materijala pripisuje se prvenstveno njihovim veoma podesnim mehaničkim osobinama koje se ispituju jednim od mehaničkih postupaka ispitivanja.

Ispitivanja materijala se vrše ne samo radi utvrđivanja osobina prilikom proizvodnje ili prijema već i u svrhu utvrđivanja načina upotrebe i odgovornosti ali i u cilju poboljšanja osobina kako bi se dobili materijali za nove proizvode, odnosno nova područja primjene. Svakodnevni tehnički razvoj prati izvođenje novih i usvršavanje postojećih metoda i postupaka ispitivanja.

Ovaj maturalski rad ja napisan po nazivima i označavanjima mehaničkih osobina, koje su usklađene sa **EN** i **ISO standardima**, koji su preuzeti. Tamo gdje nisu preuzeti ili ne postoje, navedeni standardi koji se koriste i danas na području Bosne i Hercegovine i njenom okruženju ( Hrvatska, Srbija, Crna Gora itd. )

### **Temeljni zadaci ispitivanja materijala su :**

- Određivanje pogodnih veličina za karakterizaciju svojstava materijala i njihovo kvantitativno izdržavanje u obliku upotrebljivih karakteristika
- Kontinuirana i široka automatizirana kontrola promjena svojstava materijala, koje nastaju kod proizvodnje, prerade i obrade materijala s otkrivanjem mogućih grešaka materijala
- Periodična kontrola stanja materijala nakon određenog vremena eksploatacije
- Istraživanje slučajeva raznih oštećenja i uzroka lomova mašinskih dijelova u eksploataciji
- Razvij novih materijala

### **Opšta podjela svojstava materijala koji se primjenjuju u tehnici je na :**

1. Mehanička
2. Tehnološka
3. Hemijska
4. Fizička
5. Eksploataciona

**Temeljna svojstva materijala su mehanička** : čvrstoća, napon tečenja, modul elastičnosti, izduženje, žilavost, tvrdoća, dinamička izdržljivost. Karakteristika materijala predstavlja mjerljivu veličinu materijala, koje se može brojčano odrediti pomoću standardizovanih metoda ispitivanja, npr. čvrstoća nekog čelika.

**Tehnološka svojstva** materijala pokazuju njegovu sposobnost za obradu različitim postupcima.

**Hemijska svojstva** su hemijski sastav materijala i otpornost na koroziju.

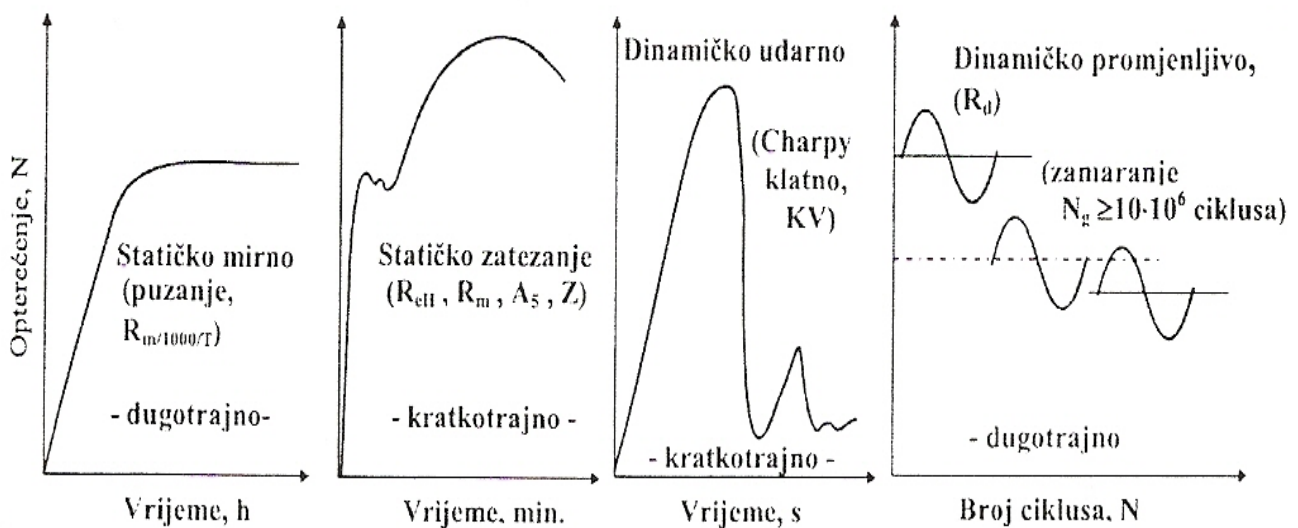
**Eksploataciona svojstva** pokazuju otpornost materijala u upotrebi.

## MEHANIČKA ISPITIVANJA

**Opšta podjela mehaničkih svojstava i uslova ispitivanja su sljedeća :**

- Prema načinu djelovanja opterećenja na : zatezanje, pritisak, savijanje, uvijanje, smicanje, te kombinacije kao zatezanje i pritisak itd.
- Prema brzini djelovanja opterećenja na : statičko i dinamičko
- Prema temperaturi ispitivanja na : sobnoj, povišenoj i na sniženoj
- Prema trajanju djelovanja opterećenja na : kratkotrajna i dugotrajna

*Slika 1. Uporedni pogled statičkih i dinamičkih opterećenja [ 1 ]*

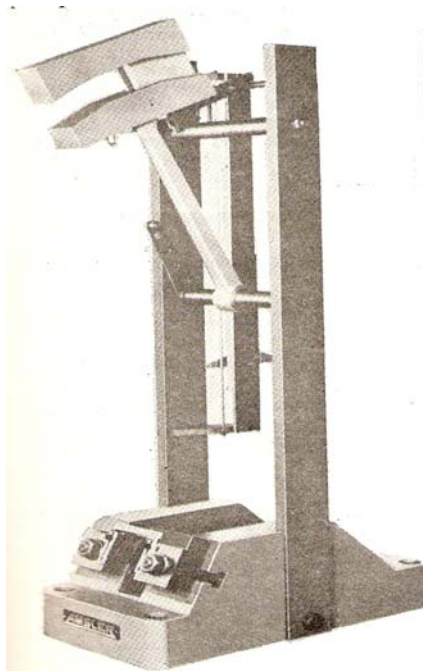


# DINAMIČKE METODE ISPITIVANJA

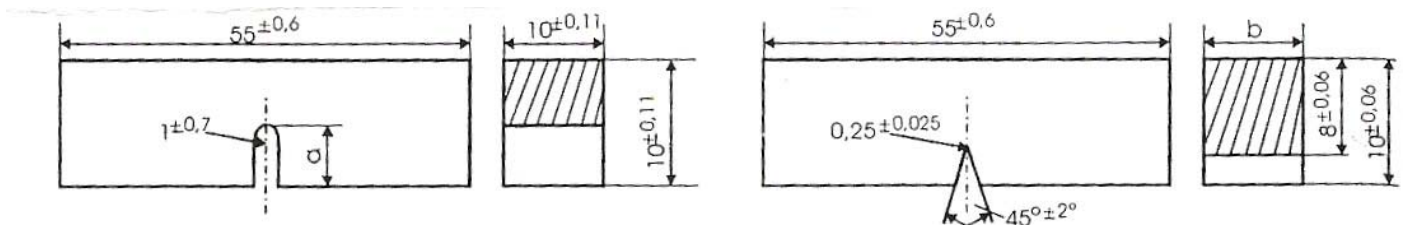
## Ispitivanje udarne radnje loma

Ispitivanje udarne radnje loma zarezane epruvete po Charpyju je jedno od najstarijih mehaničkih metoda ispitivanja materijala u eksploatacionim uslovima, a **služi za utvrđivanje njegove otpornosti prema krutom lomu**. Na Charpyjevu klatnu ( slika 2. ) ispituje se jednim udarcem s brzinom obično 5 do 5,5 m/s zarezane epruvete ( s U-zarezom ili V-zarezom - slika 3. ). Radnja (energija ) utrošena za lom epruvete ( izražena u džulima J ) je mjera žilavosti materijala, a zahtjeva se i kod razvoja novih materijala, kod provjere gotovih materijala, te kod analize loma usljed raznih kvarova u praksi.

*Slika 2. Opšti oblik Charpyjevog klatna [ 1 ]*



*Slika 3. Epruvete za ispitivanje udarom po Charpyju [ 1 ]*



Epruveta s U - zarezom  
(BAS EN 10045-1)  
(HRN C.A4.004 - 1984) (ISO 83 - 1976)

$a = 5 \text{ mm}$  - normalno  
 $a = 3 \text{ (2) mm}$  - plitki zarez }  $\pm 0,09 \text{ mm}$

Epruveta s V - zarezom  
(BAS EN 10045-1)  
(HRN C.A4.025 - 1984) (ISO 148 - 1983)

$b = 10 \text{ mm}$  - normalno  
 $b = 7,5 \text{ (5) mm}$  - uska epruveta }  $\pm 0,11 \text{ mm}$

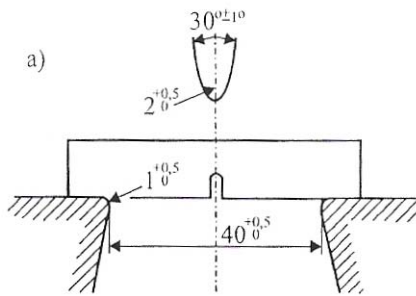
Pri ispitivanju epruveta se postavlja centrično na oslonac sa razmakom od 40 [ mm ] ( slika 4. ), a klatno slobodnim padom udara tačno u njezinu sredinu sa suprotne strane od zarez a lomi je jednim udarcem. U početnom položaju potencijalna enargija Carpyjevog klatna obično iznosi 300, 150, ili 100 [ J ]. Nakon puštanja klatna njgova potencijalna enargija pretvara se u kinetičku. Dio te enargije utrošen na lom epruvete naziva se **udarna radnja loma**. Udarna radnja loma metalnih materijala se ispituje normiranim (standardiziranim) epruvetama kvadratnog ili pravougaonog poprečnog presjeka sa zatezom u obliku slova U ( oznaka KU ) ili slova V ( oznaka KV ), slika 3.

Formule za izračinavanje potencijalne enargije i udarne radnje loma glase :

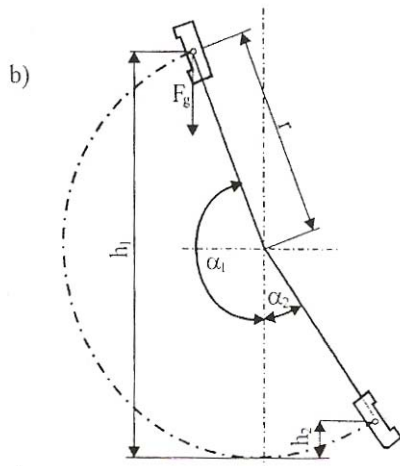
$$E_{pot} = F_g \cdot h_1, \quad [ J ]$$

$$E_{url} = F_g \cdot ( h_1 - h_2 ), \quad [ J ]$$

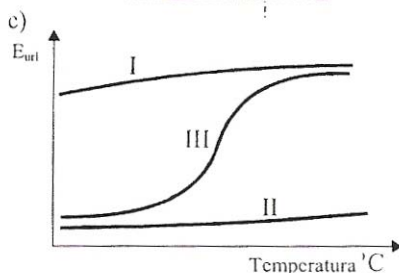
**Slika 4. Ispitivanje udarom po Charpy-ju [ 1 ]**



a) detalj vrha klatna i položaj epruvete na osloncima



b) položaj klatna na početku i kraju ispitivanja udarom



c) opšti izgledi dijagrama zavisnosti udarne radnje loma  $E_{url}$  od temperature ispitivanja

I - legure s FCC (PCK) rešetkom  
 II - legure s BCC (VCK) rešetkom  
 III - visokočvrsti materijali

Za utvrđivanje važnog svojstva žilavosti materijala ispituju se tri iste epruvete na propisanoj temperaturi, pri čemu nesmije biti veće rasipanje vrijednosti od 30% u odnosu na minimalnu propisanu vrijednost ( samo jedna od njih može imati nižu vrijednost ). U standardima za prijem i isporuku metalnih materijala propisane su minimalne srednje vrijednosti udarne ranje loma. Sljedeća formula se odnosi na izračunavanje žilavosti K :

$$K = KV \text{ ( ili KU ) } / S$$

**Tabela 1. Ostale epruvete žilavosti za metalne materijale [ 1 ]**

Naziv epruvete	Oznaka	Dimenzije, mm	Površina lomnog presjeka, cm <sup>2</sup>
Epruveta njemačkog udruženja za ispitivanje materijala	DVM ( 3 U )	10*10*55	1(1-0,30 ) = 0,70
Pravougaona epruveta njemačkog udruženja	DVMF ( 4U )	8*10*55	0,8( 1-0,40 ) = 0,48
Messenger epruveta	Mes ( 2U )	10*10*55	1( 1-0,20 ) = 0,80
Mala epruveta njemačkog udruženja	DVMK	6*6*44	0,60( 0,60-0,20 ) = 0,24
Epruveta udruženja švicarske mašingradnje	VSM ( 2,5 U )	10*10*55	1( 1-0,25 ) = 0,75

Epruvete s V-zarezom obavezno se koriste za određivanje udarne radnje loma opštih konstrukcionih čelika ( npr. Č. 0561 ), a epruvete sa U-zarezom kod ispitivanja svojstava kvalitetnijih čelika ( npr. Čelici za poboljšanje kao Č.1531, Č. 4732 i sl. ).

## UTICAJNI FAKTORI NA ŽILAVOST MATERIJALA

Na žilavost materijala utiče niz faktora kao što su :

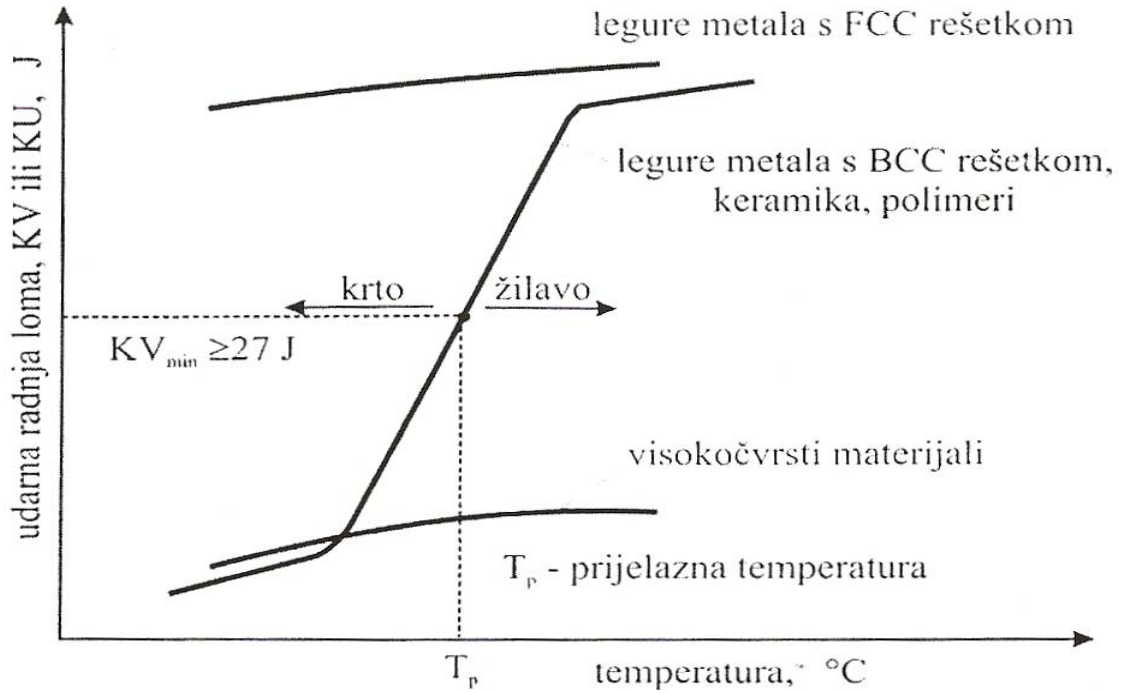
1. Temperatura ispitivanja
2. Mikrostruktura ( osobito veličina zrna )
3. Oblik i dimenzije zareza
4. Dimenzije epruvete
5. Brzina udara

### 1. TEMPERATURA ISPITIVANJA

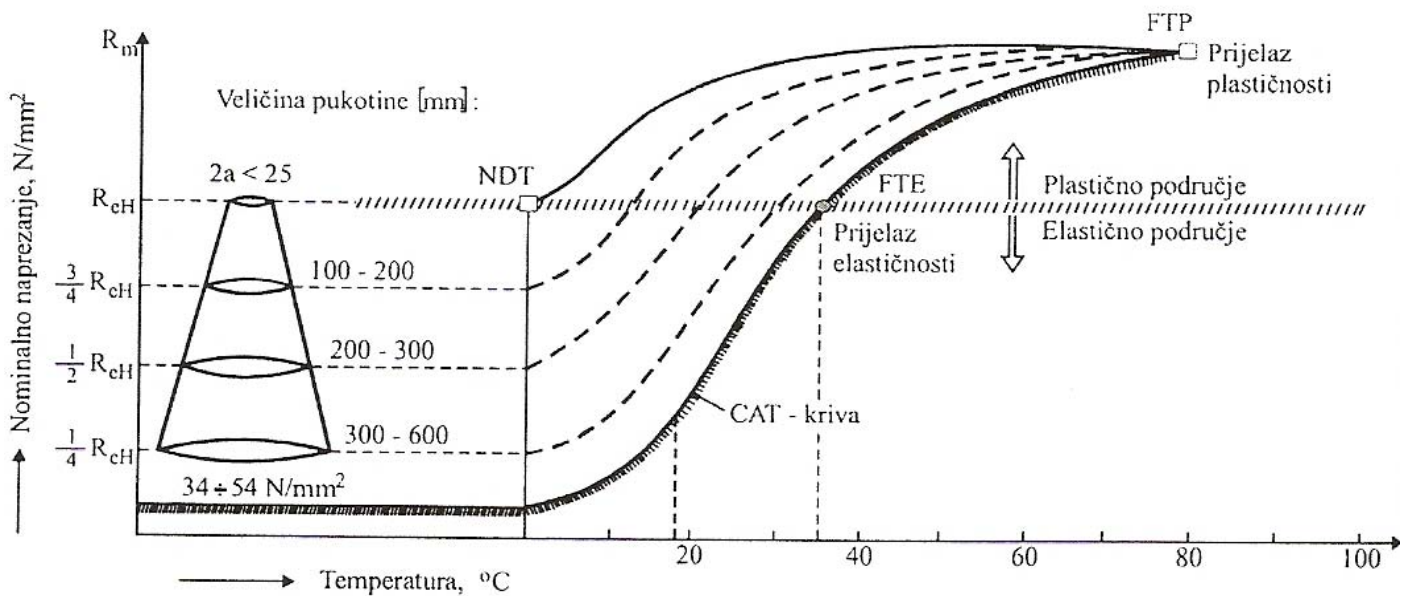
Temperatura ispitivanja ima najveći uticaj na žilavost, odnosno na udarnu radnju loma. Žilavost materijala općenito opada sa snižavanjem temperature ispitivanja. To je općenito zbog toga što se snižavanjem temperature snižava i plastičnost, odnosno deformabilnost materijala.

**Temperatura nulte duktilnosti ili NDT-temperatura** ( NDT– Nil Ductility Transition ) je također mjera žilavosti. To je najviša temperatura pri kojoj pukotina prodire kroz čitav presjek epruvete, tj. na njoj se gube svojstva plastičnosti kod čelika. Ispod NDT-temperature očekuje se krto ponašanje materijala iako je veličina nominalnog naprežanja niža od napona tečenja, slika 6.

*Slika 5. Dijagram udarna radnja loma-temperatura [ 1 ]*



*Slika 6. Dijagram analize loma po Pelliniju [ 1 ]*



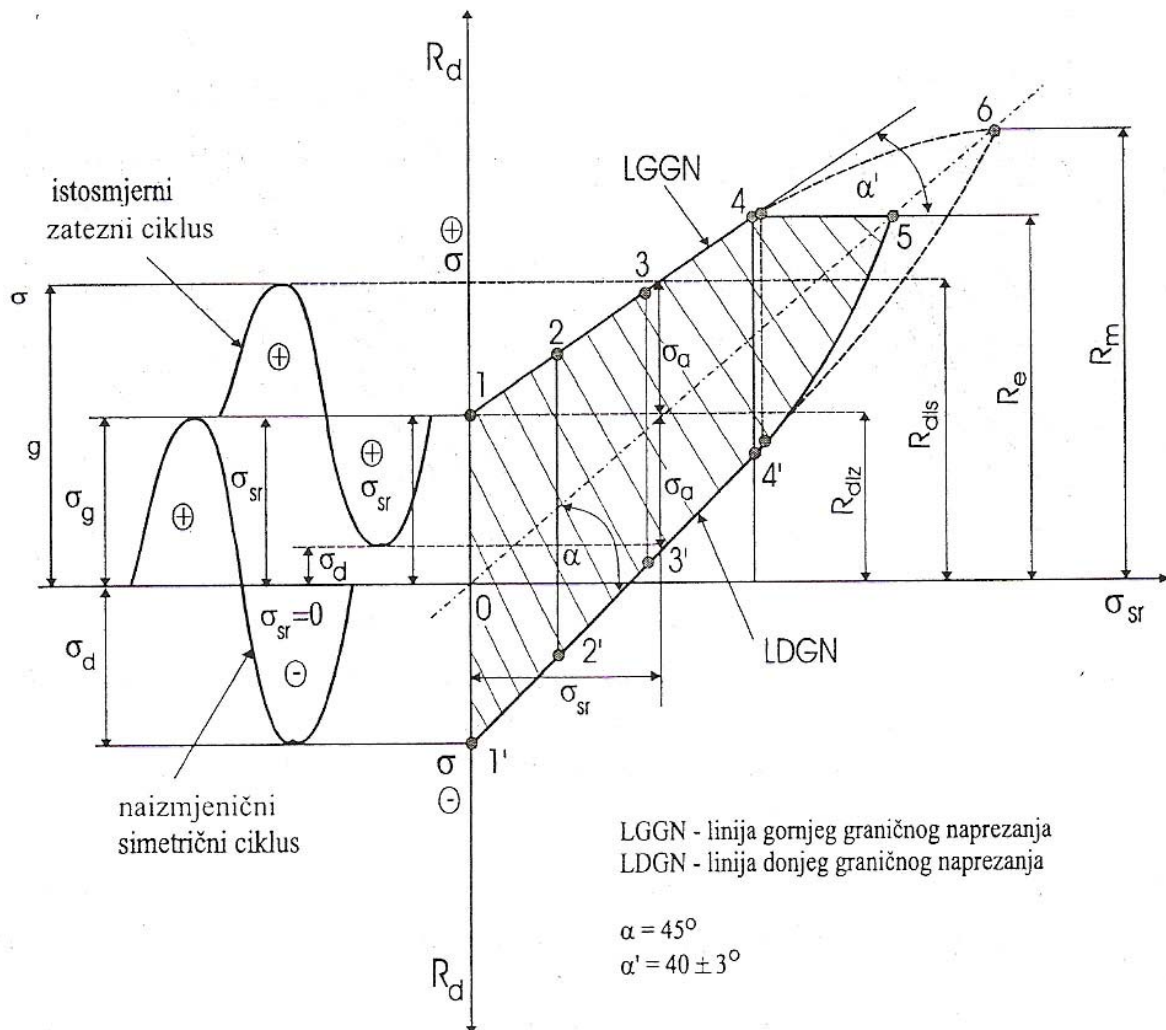
**2. MIKROSTRUKTURA** - ima također veliki uticaj na žilavosti materijala. Naručito povoljno utiče na žilavost smanjivanjem veličine zrna. Tako smanjivanje veličine zrna za jedan stepen po ASTM –skali snižava prijelaznu temperaturu za 15 °C. Veću žilavost, odnosno nižu prijelaznu temperaturu ima i deformisani materijal zbog anizotropne strukture, naručito u uzdužnom pravcu.

**3. OBLIK I DIMENZIJE ZAREZA** - također znatno utiču na žilavost. Zarezi izazivaju koncentraciju približno trodimenzionalnih napreznja, normalna napreznja djeluju pri tome na zatezanje dok tangencijalna izazivaju klizanje.

**4. DIMENZIJE EPRUVETE** - različito utiču na žilavost materijala. Najmanje utiče dužina epruvete, dok širina i debljina utiču slično na smanjivanje žilavosti. Pri tome najvažniji odnos je odnos dubine zareza prema debljini epruvete, koji treba biti manji od 0,3 ako se želi smanjivanje žilavosti.

**5. BRZINA UDARA Charpyjevog** klatna nema znatnijeg uticaja na žilavost materijala ako je u rasponu 3 do 7 m/s, dok znatno veće brzine ( 20-50 m/s ) smanjuju žilavost zbog smanjenog udjela plastične deformacije.

**Slika 7. Smithov dijagram za pozitivne vrijednosti srednjeg napreznja [ 1 ]**



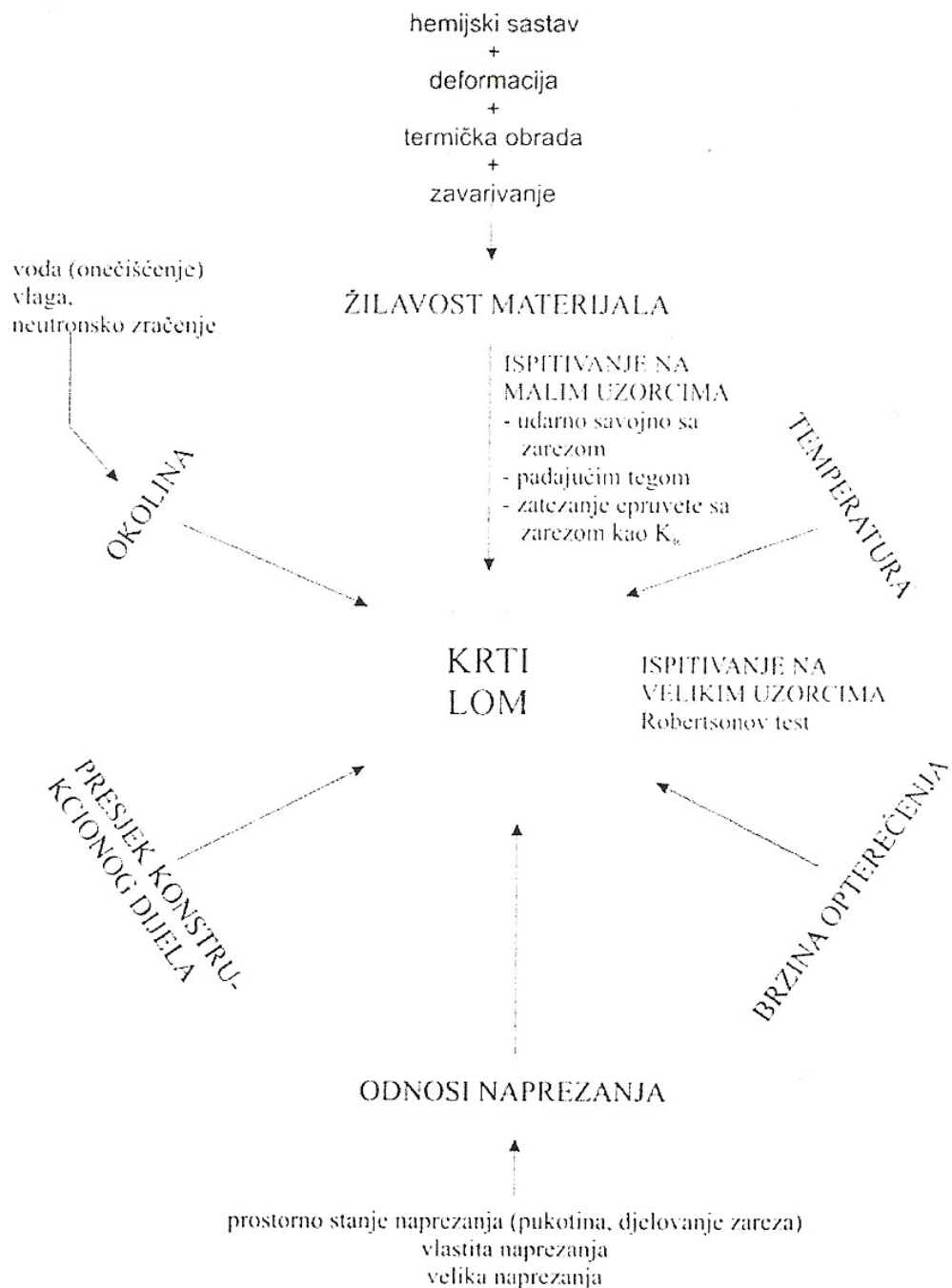


## DRUGE METODE ISPITIVANJA UDAROM

Pored ispitivanja po Charpyju koriste se u nekim državama i druge standardne ili nestandardne metode ispitivanja udarom. To su :

1. Pelindijeva metoda
2. Metoda po Izodu
3. Bruggerova metoda
4. Tehnološko ispitivanje

*Slika 8. Uticajni faktori na kruti lom [ 1 ]*

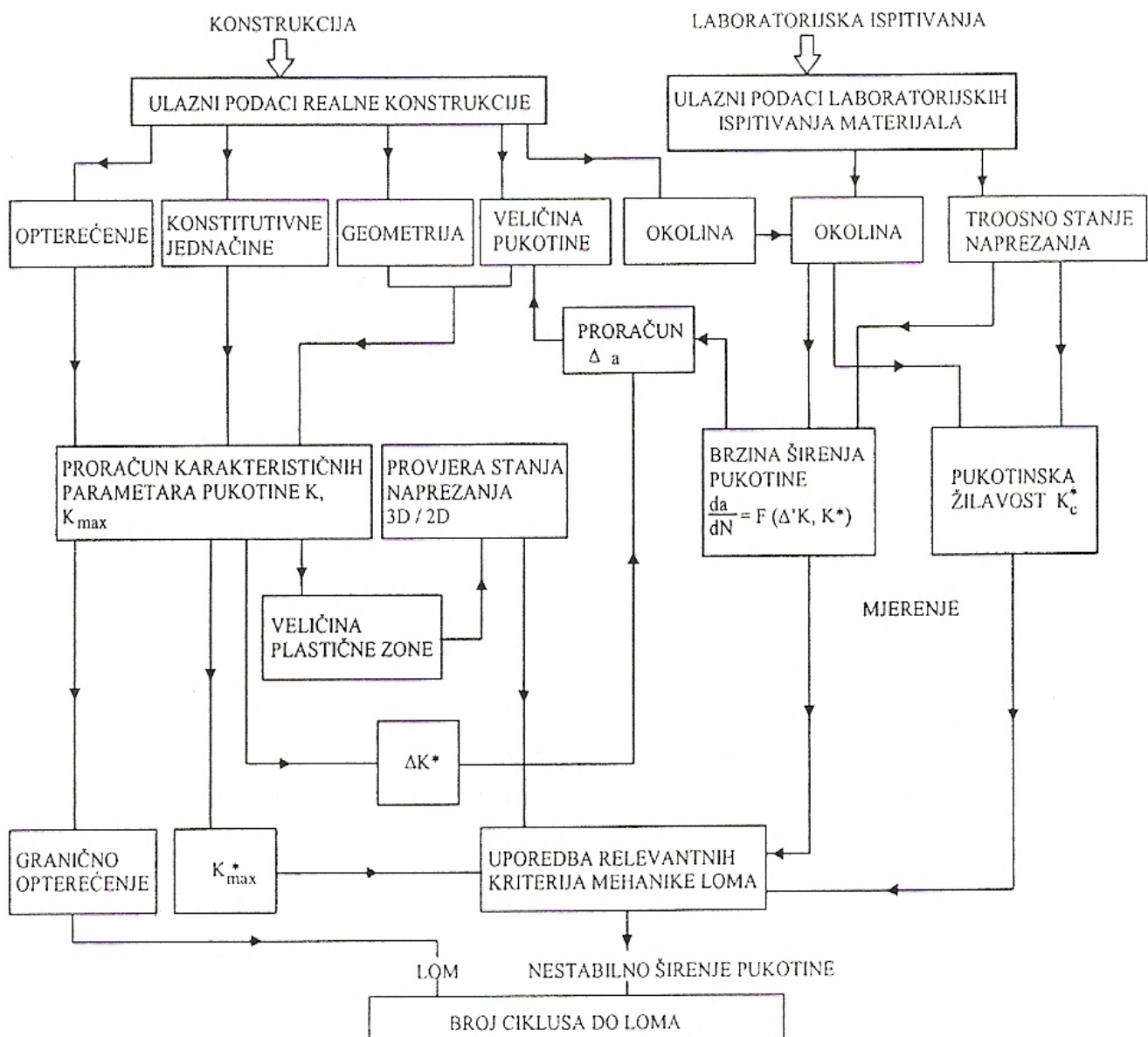


## ISPITIVANJE LOMNE ŽILAVOSTI

Lomna ili pukotinska žilavost  $K_{Ic}$  ( Plane Strain Fracture Toughness ) je novije važno važno mehaničko svojstvo materijala, koje najbolje definiše njegovu otpornost prema nestabilnom rastu pukotine u njemu pod precizno određenim uslovima. Drugačije rečeno lomna žilavost je kritična vrijednost koncentracije naprezanja na vrhu pukotine pri kojoj nastupa nestabilni rast pukotine pod uslovima stanja ravnanske deformacije.

Uslove zavisnosti rasta pukotine između njene dužine i naprezanja propisuje linearno elastična mehanika loma ( LEML ). Mehanika loma ( Fracture Mechanics ) proučava nastajanje, širenje i razvoj pukotine u materijalu sve do nastanka pukotine. Polazna tačka mehanike loma je činjenica da nema idealnih materijala, tj. Materijala bez grešaka, već da u njima postoje greške tipa pukotine. Smisao mehanike loma najbolje ilustruje izreka poznatog njemačkog znanstvenika Alberta Kochendörfera: “ *Filozofija loma znači živjeti sa greškama, ali s njima treba tako ovladati da ne dovedu do katastrofa* “.

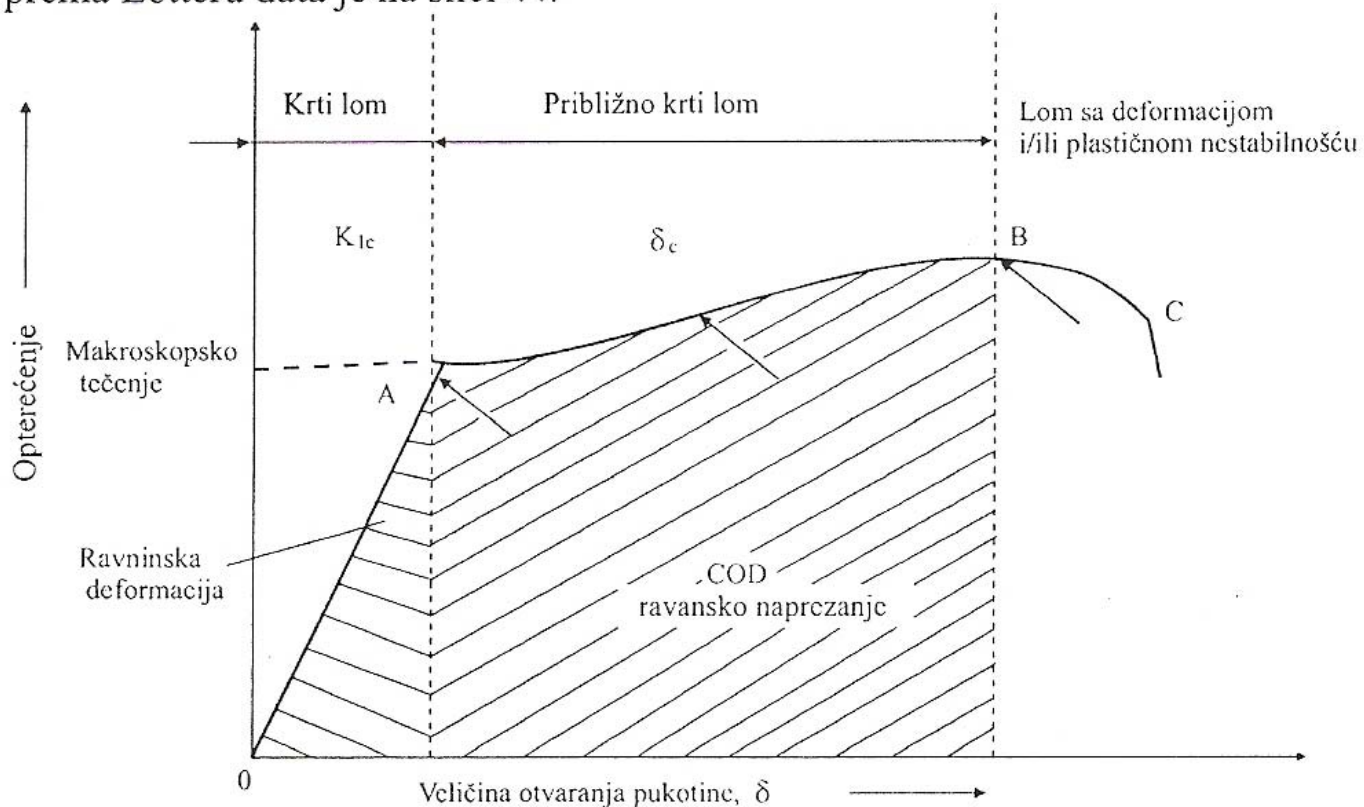
Slika 8. Postupak provjere elemenata konstrukcije s pukotinom [ 1 ]



**Slika 9. Područja primjene mehanike loma [ 1 ]**

$R_m$  - zatezna čvrstoća materijala.

Shematski prikaz proširenja primjene mehanike loma s konceptom COD prema Lotteru data je na slici 44.



**Trougao povezanih zavisnosti mehanike loma :**

1. Parametri mehanike loma koji se određuju pri mehaničkom ispitivanju materijala
2. Veličine, položaj i oblik grešaka koje se određuju ispitivanjem materijala bez razaranja ( ultra zvuk i sl.)
3. Analiza naprezanja proučavanjem parametara oko vrha pukotine u materijalu

**Pomoću navedene tri zavisnosti moguće je definisati ciljeva ispitivanja mehanike loma kako slijedi :**

1. Sigurnost od loma
2. Preostali vijek konstrukcije sa pukotinom ili greškom
3. Razvoj i optimiranje materijala
4. Osiguranje kvaliteta
5. Tehnička dijagnostika
6. Analiza različitih slučajeva složenih oštećenja konstrukcija

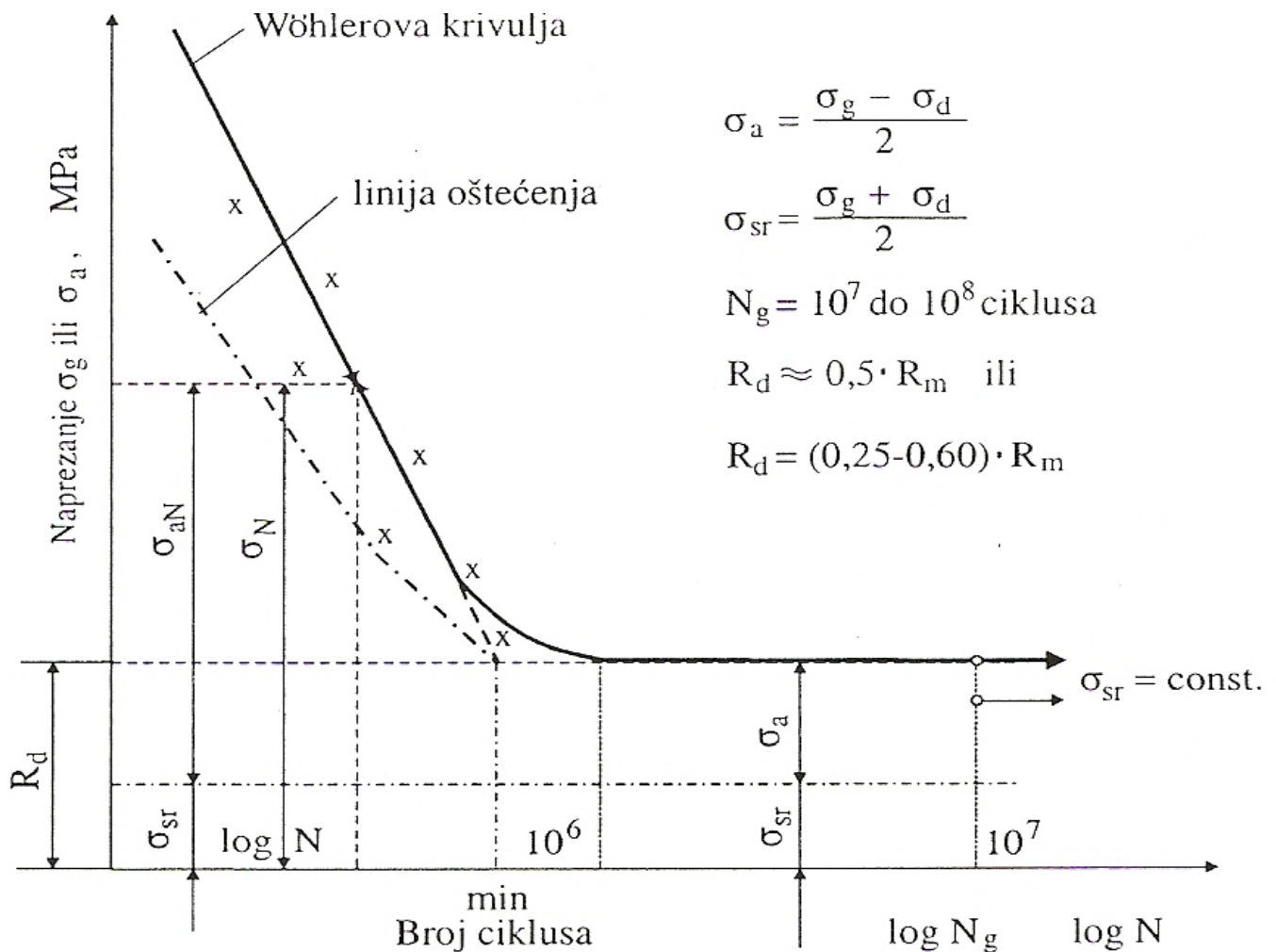
## ISPITIVANJE ZAMARANJEM

Zamarenje je pojava postepenog oštećivanja materijala usljed dugotrajnog djelovanja periodičnih promjenljivih oštećenja odnosno naprezanja. Ponašanje materijala pri zamaranju najlakše se izučava ispitivanjem na posebnim uređajima - zamaralicama. Na serijama od desetak poliranih epruveta ili pak konstrukcionih djelova provodi se sinusna promjena amplituda naprezanja oko nepromjenljivog srednjeg naprezanja. Epruvete od metalnih materijala ispituju se frkvencijama od 10 do 400 Hz, a za granični broj ciklusa  $N_g$  uzima se obično 10 miliona ciklusa ( raspon vrijednosti  $N_g$  kod visokocikličnog zamora je uglavnom između 2 i 100 miliona ciklusa ). Krivulja koja pokazuje zavisnost broja izdržanih ciklusa od promjenjenog naprezanja pri ispitivanju naziva se **Wöhler-ova ili S-N krivulja** ( Stress - Number curve ). Naprezanja mogu biti savojna, zatezno-pritisna i torziona. Prema definiciji razlikuju se naizmjenična dinamička izdržljivost, i istosmjerna dinamička izdržljivost. Dinamička izdržljivost ili dinamička čvrstoća, po definiciji je ono najveće primjenjeno naprezanje pod kojim ispitivana epruveta izdrži propisani ili beskonačni broj ciklusa bez pojave loma ili nekog drugog propisanog učinka.

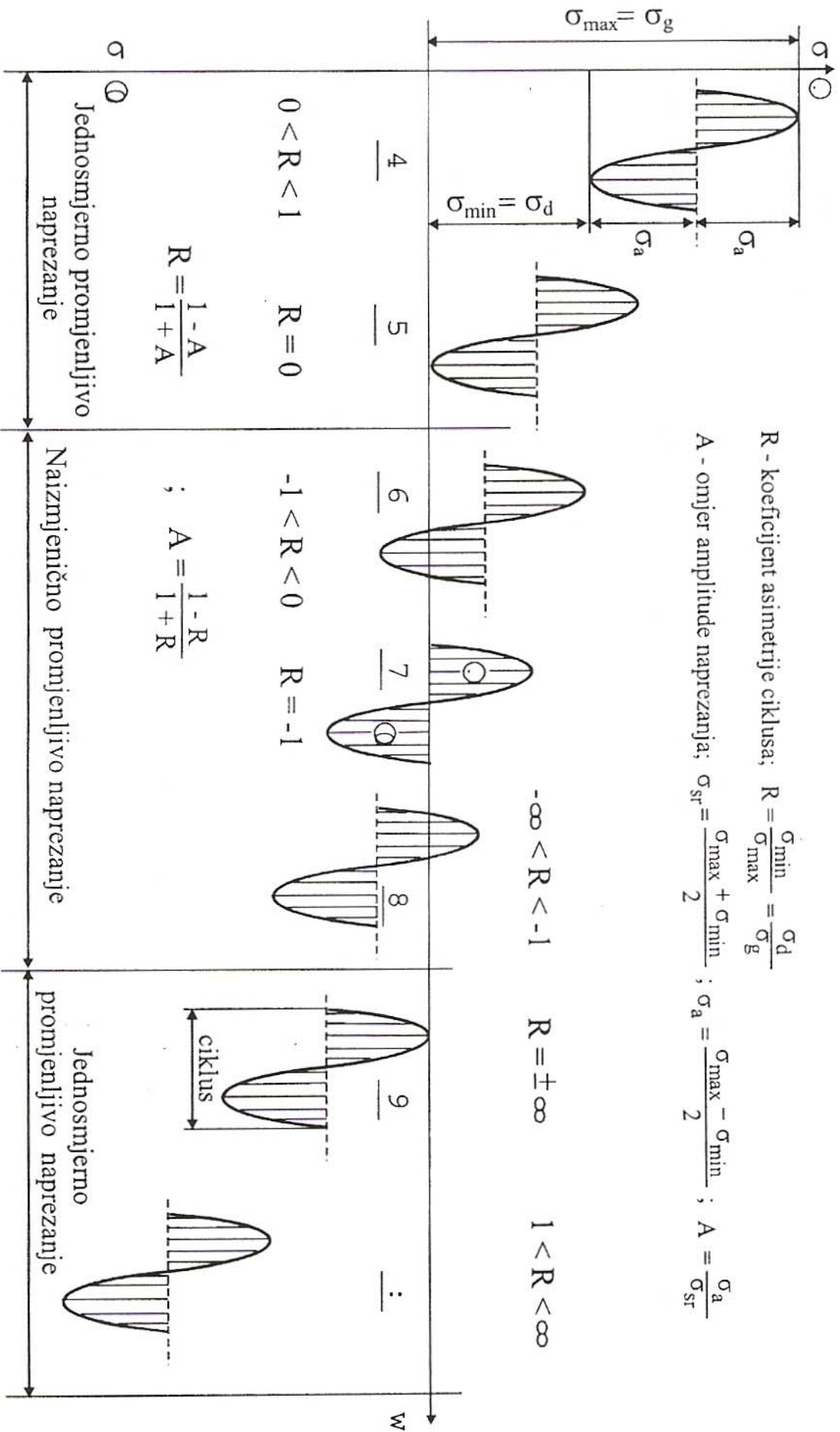
Pojavi zamaranja izložen je ogroman broj dijelova i/ili mašinskih konstrukcija i transportnih sredstava. Zato čak 80 do 90% svih lomova kod mašinskih dijelova imaju karakter usljed zamaranja materijala.

Lom usljed zamaranja materijala počinje sa mjesta gdje je najveća koncentracija naprezanja zbog bilo kakvog površinskog opterećenja iz tzv. žarišta ili inicijalnog mjesta ili pak unutrašnjeg opterećenja.

Slika 10. Wöhlerova kriva [ 1 ]

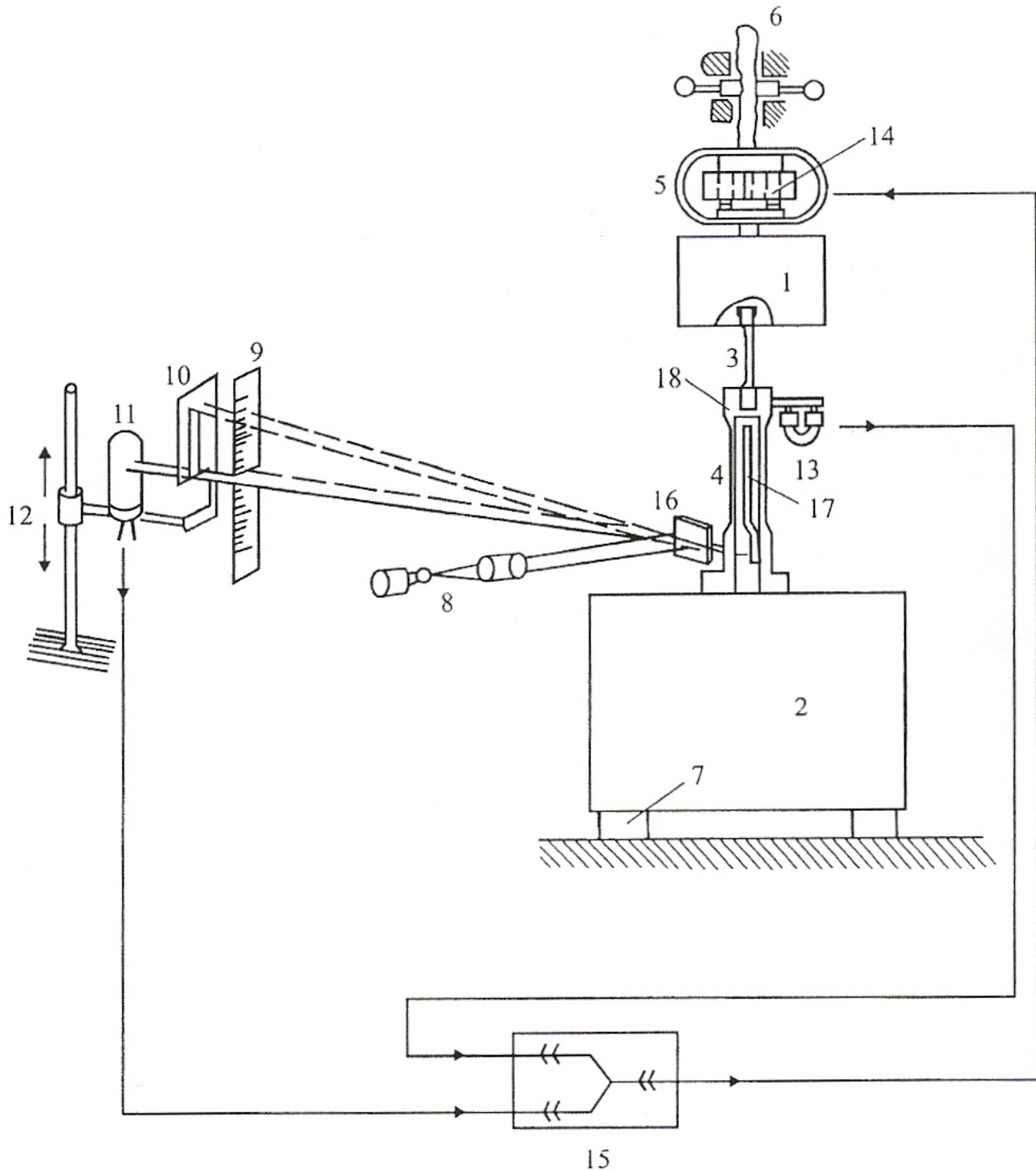


Slika 11. Sedam karakterističnih ciklusa promjenljivih naprezanja [ 1 ]





Slika 12. Šema visokofrekventnog pulzatora Amsler opterećenja do 100 kN [ 1 ]



- 1. Glavna masa
- 2. Protiv masa
- 3. Uzorak za ispitivanje
- 4. Dinamometar
- 5. Prednaponska opruga magneta
- 6. Vreteno
- 7. Podložne opruge
- 8. Optički sistem
- 9. Dinamometrijska skala

- 10. Blenda
- 11. Fotoćelija
- 12. Klizač fotoćelije
- 13. Pobudni generator
- 14. Pogonski magnet
- 15. Pojačivač
- 16. Ogledalo
- 17. Komparativna traka
- 18. Stezna glava

# LITERATURA

1. **Vitez I. Oruč M. Sunulahpašić R.**  
**:ISPITIVANJE METALNIH MATERJALA :**

2. **Terzić P. : ISPITIVANJE METALA :**

3. **STANDARDI**

**ASTM E 399-83 ( prednacrto bio ASTM E-24/69.)**

**BAS EN ISO 12737/05**

**ESIS P2**

**ASTM E24. 01-82**

**ASM-85**

**DVM Merkblatt 0001, Entwurf 3.85**

**ASTM E 813-81**