

**METALURŠKI FAKULTET SVEUČILIŠTA U
ZAGREBU**

ISPITIVANJE MATERIJALA

doc. dr.sc. Stoja Rešković

SADRŽAJ

1. UVOD

2. OSIGURANJE KVALITETE I NORMIZACIJA

3. PREGLED METODA ISPITIVANJA

4. MEHANIČKA ISPITIVANJA

4.1. Statička kratkotrajna ispitivanja

- Hookeov zakon
- vlačna ispitivanja
- tlačna ispitivanja
- ispitivanja na povišenim i sniženim temperaturama

4.2. Statička dugotrajna ispitivanja

- puzanje materijala
- relaksacija

4.3. Dinamička ispitivanja

- udarni rad loma
- umor materijala

5. MEHANIKA LOMA

6. ISPITIVANJE TVRDOĆE

7. TEHNOLOŠKA ISPITIVANJA

8. DEFEKTOSKOPSKA ISPITIVANJA

- vizualna ispitivanja
- rendgenska ispitivanja
- magnetna ispitivanja
- ultrazvučna ispitivanja
- ispitivanja penetracijskim tekućinama

9. PREPORUČENA LITERATURA

1. UVOD

Cilj ispitivanja materijala je određivanje temeljnih i uporabnih svojstava materijala.

- O temeljnim mehaničkim svojstvima materijala kao što su tvrdoća i čvrstoća, znale su stare civilizacije (Egipćani, Grci, ...)
- Prvo pisano izvješće o mehaničkom ispitivanju materijala potiče iz 16.stoljeća od Leonarda da Vinci.
- Od 16 stoljeća do 21. stoljeća radi se na usavršavanju raznih metoda ispitivanja materijala.
- Danas – informatička tehnologija, nove tehnike i nastavak razvoja

Razvoj ispitivanja materijala od 16. stoljeća

- 1519. Leonardo da Vinci – vlačna čvrstoća žice
- 1638. Galileo Galilei - lom materijala kod savijanja
- 1678. Robert Hooke - zakon o proporcionalnosti opterećenja i deformacije tijela
- 1773. C. A. Coulomb - hipoteza kidanja pri najvećem smičnom naprezanju
- 1807. Thomas Young – modul elastičnosti
- 1864. H.C. Sorby - prva metalografska ispitivanja
- 1867. A. Wöhler - ispitivanje materijala umaranjem
- 1895. L. Tetmayer – Internacionalna udruga za ispitivanje materijala
- 1900. J.A.Brinell - ispitivanje tvrdoće

- 1901. G. Charpy - ispitivanje udarom
- 1906. A.F.Shore - uveo metodu dinamičkog ispitivanja tvrdoće čelika
- 1912. M. Laue - postavio osnove ispitivanja kristalne strukture i naprezanja rendgenskim zrakama
- 1914. Erihsen - tehnološko ispitivanje dubokim izvlačenjem tankih limova
- 1919. Rockwell - ispitivanje tvrdoće
- 1929. Sokolov - ultrazvučno ispitivanje
- 1943. Horger - utjecaj unutarnjih naprezanja na umaranje materijala
- 1945. Ewin - mjerenje debljine ultrazvukom
- 1959. J. Krautkrämer – AVG/DGS dijagnostička skala za ispitivanje ultrazvukom

Tablica 1.2: Vrste ispitivanja i ciljevi

	Vrsta ispitivanja	Rezultati i saznanja
1	Mehanička	Temeljna svojstva materijala: čvrstoća, žilavost, tvrdoća ..
2	Tehnološka	Uporabna svojstva materijala: deformabilnost, zavarljivost,..
3	Metalografska	Strukturna svojstva, veličina zrna
4	Kemijska	Sastav materijala, otpornost prema koroziji
5	Fizikalna	Toplinska, električna, magnetna, optička svojstva
6	Defektoskopska	Nerazorne metode koje otkrivaju nevidljive greške

2. OSIGURANJE KVALITETE I NORMIZACIJA

2.1. EUROPSKA NORMIZACIJA

- Nakon Drugog svjetskog rata u zemljama zapadne Europe pojavila se ideja i vizija da se stvore Ujedinjene države Europe, odnosno da se eliminiraju granice.
- 1951. u Rimu
I. sporazum, **Europske zajednice za ugljen i čelik.**
Potpisnice ovog sporazuma su Belgija, Francuska, Italija, Luksemburg, Nizozemska, SR Njemačka.
- 1957. u Rimu
II. Sporazum, **Europska zajednica za energiju**
- Rim, III. sporazum, **Europska ekonomska zajednica (EEZ)**
- 1993. Maastricht, **EUROPSKA UNIJA**

- 1985. misija EZ razvila je novi pristup u tehničkom ujednačavanju i normizaciji s ciljem da se eliminiraju tehničke barijere i poboljša slobodan protok roba među članicama EZ.

Ovaj pristup baziran je na povjerenju u:

- kvalitetu i sigurnost proizvoda
- kvalitetu i kompetenciju proizvođača
- kvalitetu i kompetenciju inspekcijskih i ispitnih organizacija
- kvalitetu i kompetenciju organizacija za ovlaštenje i potvrđivanje

1989. EZ donijela je memorandum o globalnom pristupu usaglašavanja koje su se odnosile na ustanove i aktivnosti prema tablici 2.1:

■ **Tablica 2.1**

USTANOVA	AKTIVNOSTI
Vladine institucije	primjena Direktiva EU donošenjem zakona i uredbi te nadzorom provedbi
Normizacijske ustanove	izradba normi i uputa za ispitivanje radi primjene Direktiva EU
Proizvođači	osiguranje i izjava o sukladnosti s temeljnim zahtjevima
Ispitni laboratoriji	obavljanje ispitivanja i priprema izvješća za ispitivanje
Ustanove za potvrđivanje	ocjena i nadzor sukladnosti s normama i izdavanje certifikata za proizvode, osoblje i sustava upravljanja kvalitetom.
Ustanove za ovlašćivanje	ocjena i nadzor stručnosti ispitnih laboratorija, te dodjeljivanje akreditacijskih dokumenata

Zakonom regulirano područje – harmonizirani dio

Odnosi se na usklađivanje tehničkih zahtjeva proizvoda (samo na temeljne sigurnosne zahtjeve):

- zaštita zdravlja ljudi
- sigurnost ljudi
- zaštita okoliša
- zaštita potrošača

Usklađenost proizvoda s Direktivama EU potvrđuje se znakom CE.

U Europskoj uniji CE znak (COMMUNAUTES EUROPEENS) je:

- obvezno vidljiva oznaka nadzornim službenim organima na proizvodu za koji postoji Direktiva Europske unije i jamči sukladnost s temeljnim zahtjevima proizvoda stavljenog u promet.
- obvezan je, u zemljama članicama EU bez razlike od kuda je proizvođač.

CE nije:

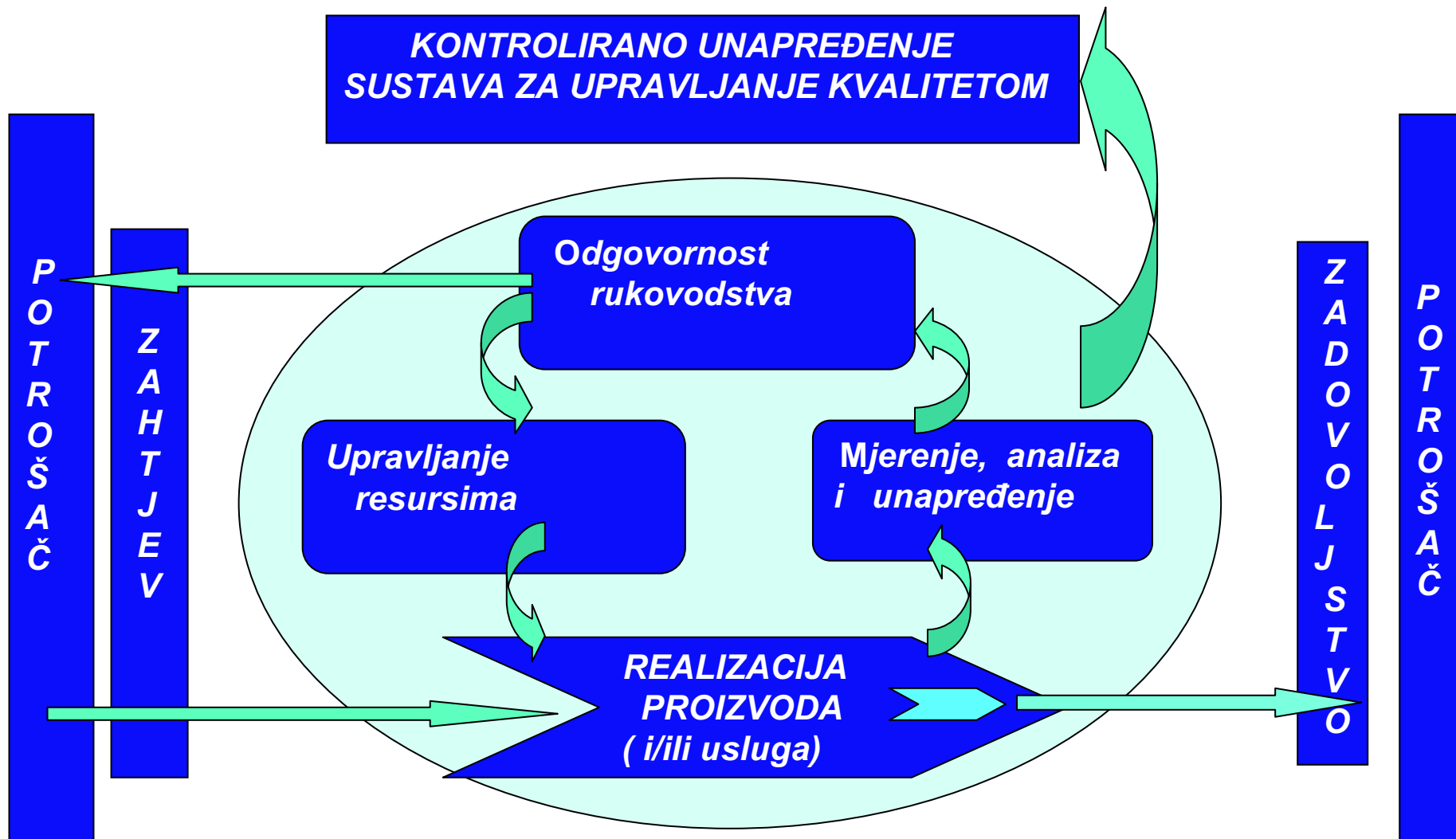
- oznaka kvalitete i sigurnosti
- oznaka stupnja zaštite okoliša
- znak određenog komercijalnog značenja

CE oznaka ne zamjenjuje druge znakove i nije namijenjena korisniku, nego nadzornom tijelu.

**CE oznaka je tehnička putovnica
roba kroz članice EU.**

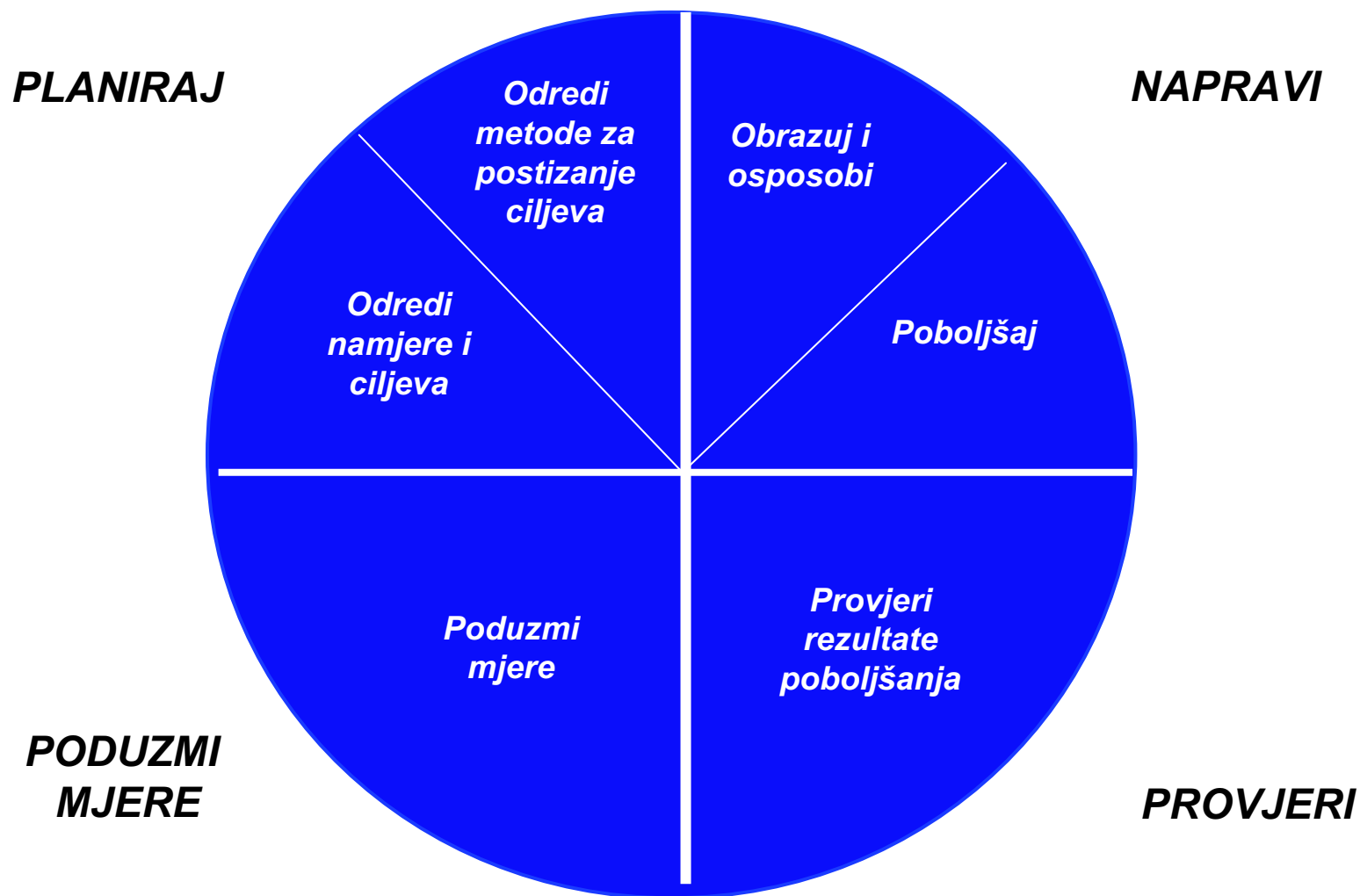
2.2. SUSTAV UPRAVLJANJA KVALITETOM

- Ocjena i nadzor sukladnosti s normama i izdavanje certifikata za proizvode, sustava upravljanja kvalitetom i osoblje

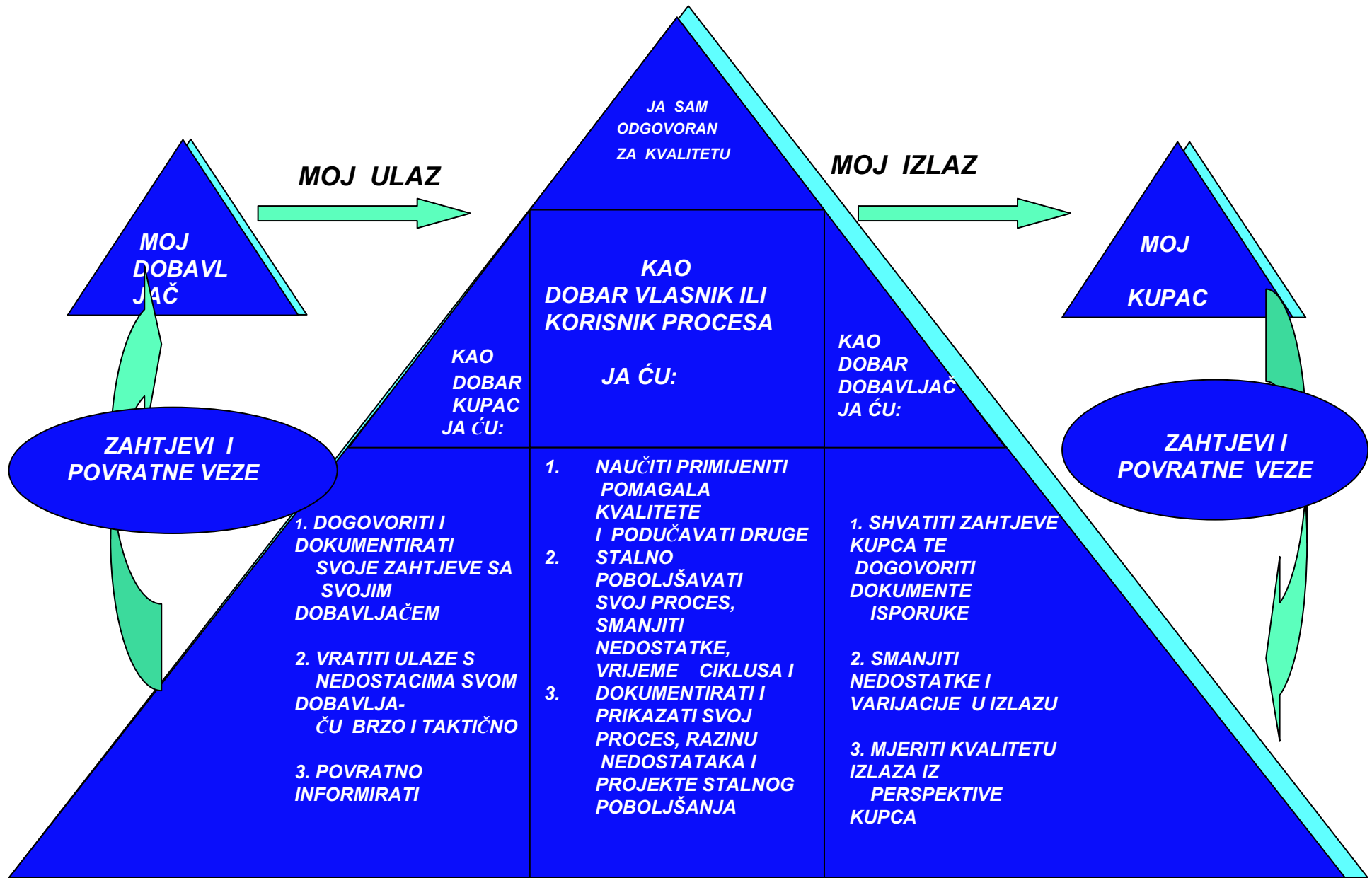


Slika 2.1.Sustav upravljanja kvalitetom

DIJAGRAM TIJEKA OVLADAVANJA KVALITETOM



Slika 2.2.



Slika 2.3.

ŹIVI STALNO POBOLJŠAVAJUĆI NAŠE VRIJEDNOSTI

2.3. NORMIZACIJA

- **Norma je isprava za opću i višekratnu uporabu , donesena koncenzusom i odobrena od priznate ustanove.**
- Norma sadržava pravila, upute ili obilježja djelatnosti ili njihovih rezultata i jamči najbolji stupanj uređenosti u određenim okolnostima

- **Norme se dijele na:**

- osnovne
- terminološke
- za ispitivanje
- za proizvod
- za postupak
- za uslugu

- **Razine normizacije:**

- međunarodna normizacija (ISO, IEC..)
- regionalna normizacija (CEN, CENELEC, EN ...)
- nacionalna normizacija (HRN, DIN, BS...)

Osobitosti Europske normizacije i standardizacije:

- osnovne osobitosti Europskih standarda leže u njihovoj povećanoj primjeni i novim oznakama čelika
- tehnički propisi usklađeni na europskoj razini za konstruiranje, proizvodnju i ispitivanje.
- od posebne važnosti je standardiziranje materijala i poluproizvoda.
- kroz nadležne udruge za standarde, od 1986., razrađeno je više europskih standarda za materijale
- u međuvremenu su također preneseni u njemačke standarde.

- 1964. – Koordinacijski odbor za nomenklaturu željeznih i čeličnih proizvoda u okviru Europske zajednice za ugljen i čelik osnovao je radne grupe za Europske standarde.
- najprije su napravljeni Europski standardi za konstrukcijske čelike za strojnu gradnju (poboljšani čelici EU 83 i čelici za cementaciju EU 84)
- zbog povećane suradnje između Europskih zemalja proizišla je potreba za usklađivanjem nacionalnih standarda u Europskoj uniji. 1986. osnovan je europski komitet za standardizaciju (CEN), Europski komitet za standardizaciju željeza i čelika (ECISS).
- rezultati rada objavljeni su kao Europski standardi, za koje postoji obveza za preuzimanjem u nepromijenjenom obliku u nacionalne standarde.

U sljedećoj tablici navedena je usklađenost nekih DIN standarda s Europskim standardima.

■ **Tablica 2.2.**

<i>Područje primjene DIN 11626/1629</i>	<i>EN standard</i>
<i>Izradba aparata</i>	EN 10216-1; EN 10217-1 <i>Bešavne odnosno šavne čelične cijevi za naprezanje pod tlakom</i>
<i>Izradba cjevovoda za</i> <ul style="list-style-type: none">- <i>plin u vezi s DIN 2470 dio 1 od 16 bara</i>- <i>voda u vezi s DIN 2460</i>	EN 10208; <i>čelične cijevi za cjevovode za zapaljive medije EN 10224; čelične cijevi, cijevni spojevi za prijevoz vodenim putem, uključujući i pitku vodu</i>
<i>Gradnja strojeva i aparata</i>	EN 10210; EN 10219; <i>Toplo odnosno hladno valjane cijevi za čelične konstrukcije iz nelegiranih konstrukcijskih čelika i sitnozrnatih konstrukcijskih čelika</i> EN 10XXX; <i>cijevi za strojnu gradnju</i> EN 10YYY; <i>cijevi za rotirajuće dijelove</i>

Podjela standarda po primjeni uslijedila je i kod oblika proizvoda:

- plosnati proizvodi
- odljevci i
- otkivci

Za sitnozrnate konstrukcijske čelike prema DIN 17102 primjer zamjene s EN standardima prikazan je u tablici 2.3.

Tablica 2.3: Zamjena DIN 17102 s EN standardima

<i>Područje primjene DIN 17102</i>	<i>EN standard</i>
<p><i>Izradba posuda pod tlakom Izradba kotlova Izradba kemijskih postrojenja Izradba rezervoara</i></p>	<p><i>EN 10029, dio 1 i 3 Plosnati proizvodi iz čelika za posude pod tlakom; Sitno zrnati konstrukcijski, zavarljivi čelici i čelici za normalizacijsko žarenje</i></p>
<p><i>Čelične konstrukcije Strojna gradnja Gradnja postrojenja Izradba vozila</i></p>	<p><i>EN 10113, dio 1 i 2 Toplo valjani proizvodi iz sitno zrnatih konstrukcijskih čelika EN 10025, dijelovi 1 do 6, konstrukcijski čelici</i></p>

2.4. OZNAČIVANJE ČELIKA PREMA EN

- **EN za označavanja čelika:**
 1. **EN 10079:1992** - Definicije čeličnih proizvoda
 2. **EN 10020-2000** - Definicije i podjela vrsta čelika
 3. **EN 10027-1:1991**- Sustav označavanja čelika
I. dio (naziv čelika, glavne oznake)
 4. **EN 10027-2:1991**- Sustav označavanja čelika
II. dio (Brojevi čelika)
 5. **CR 10260:1998** - Sustav označavanja čelika
(dodatne oznake)

Prema **EN 10027-1** označivanje čelika provodi se:

- prema namjeni, mehaničkim i fizikalnim svojstvima
- prema kemijskom sastavu

Općenita oznaka čelika

sastoji se iz 3 dijela:

Glavna oznaka	Dodatna oznaka	Dodatna oznaka za čelični proizvod
----------------------	-----------------------	---

Tablica 2. 4: Princip označavanja čelika prema dosad DIN 10027, u vezi s DIN V 17006, d. 100 (ECISS priopćenje IO 10; 1993.)

Glavni simboli	Dodatni simboli	Dodatni simboli za čelične proizvode
<ul style="list-style-type: none">- svrha primjene- svojstva(- najmanja granica razvlačenja, MPa	<ul style="list-style-type: none">- udarni rad loma- toplinska obradba- područje primjene	<ul style="list-style-type: none">- posebni zahtjevi- vrsta prevlake- stanje obradbe

2.4.1. Glavna oznaka

- **Prema namjeni, mehaničkim i fizikalnim svojstvima**

S - čelici za opće čelične konstrukcije

P – čelici za izradbu posuda pod tlakom

L - čelici za izradbu cjevovoda

E - čelici za strojogradnju

H - hladno valjani plosnati proizvodi

R -čelici za tračnice

- **Prema kemijskom sastavu**

C – nelegirani čelici sa $Mn < 1\%$

n – nelegirani čelici sa $Mn \geq 1\%$ i legirani s sadržajem pojedinog legirnim elementa $< 5\%$

X - legirani čelici $\geq 5\%$ jednog legirnog elementa

HS – brzorezni čelici, redoslijed *elemenata: W-Mo-V-Co*

2.4.2. Dodatna oznaka

a) Udarni rad loma

odnosi se na udarni rad loma pri ispitnoj temperaturi, tablica 2.5.

- Označava kod nelegiranih konstrukcijskih čelika:
 - visinu garantiranog udarnog rada loma /J/ kod ispitne temperature, prema tablici 2.5.
 - vrstu označene toplinske obradbe ili oblika proizvoda

Tablica 2.5: Dodatni simboli

27 J	40 J	60 J	°C
JR	KR	LR	+ + 20
JO	K0	L0	0
J2	K2	L2	- 20
J3	K3	L3	- - 30
J4	K4	L4	- - 40
J5	K5	L5	- - 50
J6	K6	L6	- - 60

b) Toplinska obradba

M - termomehanički valjano

N - normalizacijski žareno ili normalizacijski valjano

Q - poboljšano

c) Područje primjene

H - visoka temperatura

L - niska temperatura

R - sobna temperatura

X - visoka i niska temperatura

Dodatni simboli za čelične proizvode (prema 10260)

a) Simboli za posebne zahtjeve

b) Simboli za vrstu prevlake

c) Simboli za stanje obradbe

a) Simboli za posebne zahtjeve

+ C krupno zrnati čelici

+ F sitno zrnati čelici

+ Z 15 najmanje 15%

+H kaljivost

b) Simboli za vrstu prevlake

+A – aluminizirano plamenom

+CU – bakrena prevlaka

+Z - pocinčano plamenom

+ZE - elektrolitski pocinčano

Da bi se izbjegle zamjene s drugim simbolima, može se ispred staviti slovo S, npr. +SA.

c) Simboli za stanje obradbe

+A – meko žareno

+C - hladno očvrsnuto

+Q - kaljeno,

+ST – žareno u otopini

*T - popušteno

Da bi se izbjegle zamjene s drugim simbolima, može se ispred staviti slovo T, npr. +TA.

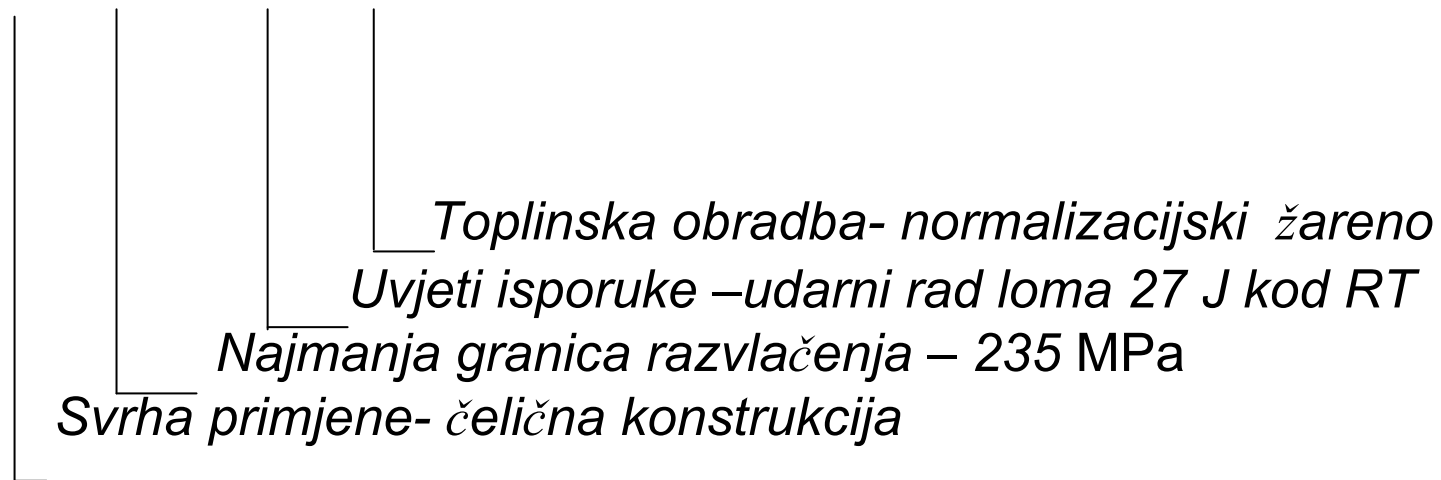
- Sadašnje stanje nacionalne i europske standardizacije čeličnih materijala za primjenu u područjima koje treba kontrolirati dano je u tablici 2.6.

Tablica 2. 6: Opći standardi za čelike

<i>DIN / EN</i>	<i>Izdanje</i>	<i>Naslov</i>	<i>Zamjena za</i>
<i>DIN EN 10027 dio 1 dio 2</i>	<i>09.92</i>	<i>Sustav označavanja čelika Skraćenice, glavni simboli Sustav numeriranja</i>	<i>DIN 17006</i>
<i>DIN EN 10079</i>	<i>02.93</i>	<i>Definicije za čelične proizvode</i>	<i>DIN 17007</i>
<i>DIN V 17006 dio 100</i>	<i>11.93</i>	<i>Sustav označavanja čelika Dodatni simboli za skraćenice</i>	<i>ECISS-priopćene IO 10:1993</i>
<i>DIN EN 20377 dio 1</i>	<i>E.11.93</i>	<i>Čelik i čelični proizvodi Uzimanje i pripreme. Isječci uzoraka i uzorci za mehanička ispitivanja.</i>	<i>DIN 17000 Poglavlje 9.4</i>
<i>DIN 50049 (EN 10204)</i>	<i>11.91</i>	<i>Metalni proizvodi, vrste uvjerenja o ispitivanju</i>	<i>DIN 50049</i>

Nelegirani konstrukcijski čelici prema DIN EN 10025

- **X XXX X XX**

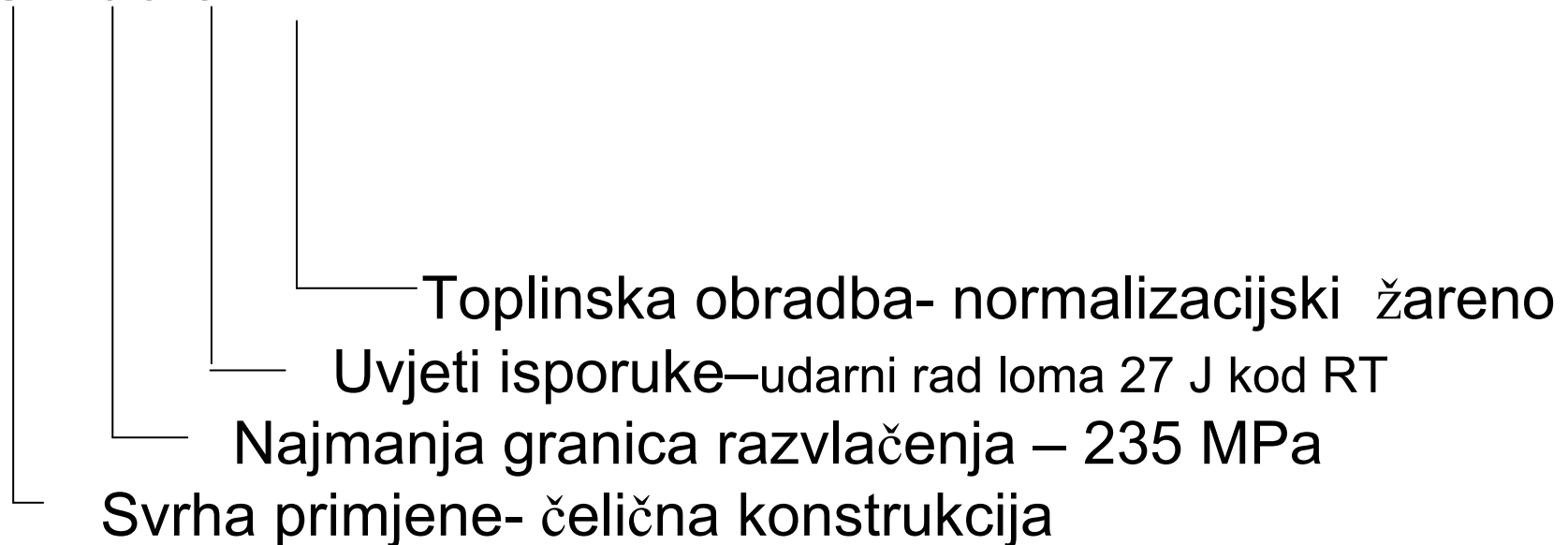


PRIMJER 1

Prema DIN EN 10025-2:

Nelegirani konstrukcijski čelik s granicom razvlačenja min 235MPa, s minimalnim udarnim radom loma od 27 J pri sobnoj temperaturi, normalizacijski žareno (RSt 37-2N)

- **S 235 JR N**



2.5. OZNAČIVANJE ČELIKA PREMA HRN C. BO. 002. (stare norme)

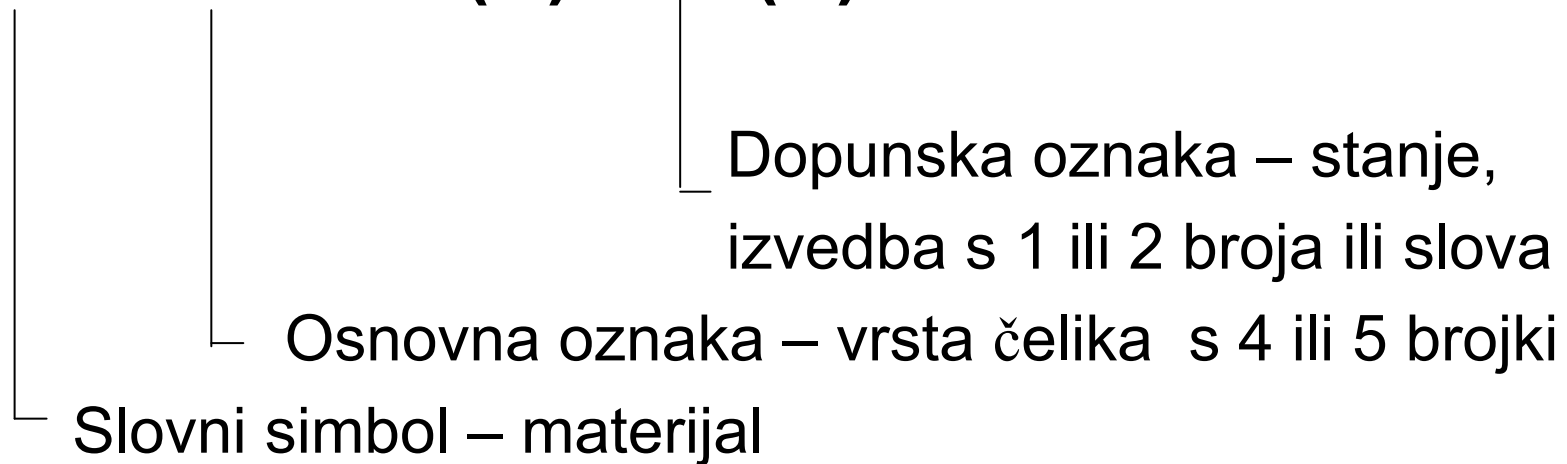
Norma HRN C. BO. 002. nije u uporabi u RH, ali kao i ostali europski standardi (DIN, F, BS..) nalazi se u dotadašnjoj literaturi i još uvijek se u praksi često koristi.

Za označivanje čelika koristili su se znakovi i simboli u obliku slova i brojeva koji su označivali najvažnije karakteristike nekog čelika.

- *Oznaka čelika sastoji se iz tri dijela:*
- **slovni simbol Č** *koji označava materijal – čelik*
- **osnovna oznaka** *koja se sastoji od četiri brojana simbola i označava vrstu čelika*
- **dopunska oznaka** *koja se sastoji od jednog ili dva brojana simbola*

- Općenita oznaka

- **Č. XXXX (X). X (X)**



Osnovna oznaka ima četiri brojana znaka i označava osobine čelika po grupama:

- a) čelici s negarantiranim kemijskim sastavom
- b) čelici s garantiranim kemijskim sastavom

2.5.1. Čelici s negarantiranim kemijskim sastavom

U ovu grupu spadaju ugljični čelici trgovačke kvalitete s propisanim mehaničkim svojstvima, a bez propisanog kemijskog sastava; ili s propisanom čistoćom P i S ili nekog drugog elementa, (C, Si, Mn).

Simboli osnovne oznake imaju sljedeće značenje:

- - simbol na prvom mjestu je 0 i označavaju pripadnost čelika ovoj grupi
- - simbol na drugom mjestu označuje grupu minimalne vlačne čvrstoće

Tablica 2. 7:

- 0 - označuje čelik bez propisanih mehaničkih osobina (trgovačka kvaliteta)
- 1 – označuje nazivnu vlačnu čvrstoću do 320MPa
- 2 – označuje nazivnu vlačnu čvrstoću do 330 do 350MPa
- 3 – označuje nazivnu vlačnu čvrstoću do 360 do 380MPa
- 4 – označuje nazivnu vlačnu čvrstoću do 390 do 480MPa
- 5 – označuje nazivnu vlačnu čvrstoću do 490 do 580MPa
- 6 – označuje nazivnu vlačnu čvrstoću do 590 do 680MPa
- 7 – označuje nazivnu vlačnu čvrstoću do 690 do 780MPa

Simboli na trećem, četvrtom ili petom mjestu označavaju:

Tablica 2. 8:

0 do 44	čelik negarantirane čistoće kemijskog sastava
45 – 79	čelik s ograničenim sadržajem P, S, C, Si. Mn
80 – 99	čelik ↑ + dodatak mikro legirnog elementa za specijalna mehanička svojstva
101 – 449	slobodno za nove čelike (na 5. mjestu nikad se ne koristi 0)
451 – 799	čelik s ograničenim sadržajem P i S, ili C, Si. Mn
801 – 999	čelik + dodatak mikrolegirnog elementa za specijalna mehanička svojstva

2.5.2. Čelici s garantiranim kemijskim sastavom

U ovu grupu spadaju:

- . **UGLJIČNI**

- obični konstrukcijski čelici s garantiranim sastavom

- .. **LEGIRANI**

- niskolegirani sa zbrojem legirajućih elemenata $< 5\%$

- visokolegirani sa zbrojem legirajućih elemenata $\geq 5\%$

- . **UGLJIČNI ČELICI**

- **simbol na 1. mjestu** je uvijek 1

- **simbol na 2. mjestu** je 10 puta % ugljika zaokružen na desetinu

2.5.2.1. Legirani čelici

- Simbol na prvom mjestu je brojčani simbol legirnog – **najutjecajnijeg** elementa, prema tablici 2.9.
- Faktor vrijednosti pojedinih legirnih elemenata dan je u tablici 2.10

Tablica 2.9: Brojčani simbol legirnog elementa

Brojčani simbol legirnog elementa	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Legirni element	C	Si	Mn	Cr	Ni	W	MO	V	ostali

Tablica 2.10: Faktor vrijednosti

Legirni element	Si	Mn	Cr	Ni	W	Mo	V	Co	Ti	Cu	Al	Ostali
Faktor vrijednosti	1	1	4	4	7	14	17	20	30	1	1	⁴⁴ 30

- **Simbol na drugom mjestu:**
 1. Kod ugljičnih čelika s propisanim sastavom označava deseterostruku vrijednost maksimalnog postotka C zaokruženog na desetine, ako čelik sadrži 0,90% C ili više od 0,90% C. Brojčani simbol na drugom mjestu uvijek je 9.
 2. Kod legiranih čelika drugi po redu legirni element s odgovarajućem brojčanim simbolom.
- **Simbol na trećem, četvrtom i petom mjestu predstavlja radni broj čelika:**
- **Dopunska oznaka (tablica 2.11)**

■ Tablica 2.11:

0 - 19	Ugljični čelici propisanog sastava i legirani čelici namijenjeni za toplinsku obradbu
0 – 19 (101 – 199)	Ugljični i legirani čelici namijenjeni toplinskoj obradbi
20 – 29 (201 – 299)	Ugljični i legirani čelici za cementaciju
30 – 39 (301 – 399)	Ugljični i legirani čelici za poboljšanje
40 – 49 (401 – 599)	Ugljični i legirani čelici za alate
50 – 59	Visoko legirani čelici za alate
60 – 69	Čelici s osobitim fizikalnim svojstvima
70 – 79 (701 – 799)	Čelici kemijski postojani i vatrootporni
80 – 89	Brzorezni čelici
90 - 99	Čelik za automate
(901 – 999)	Slobodno za nove čelike

■ Tablica 2.12:

	Čelici	s utvrđenim vlačna čvrstoće	Čelici s	Utvrđenim kemijskim sastavom
		Ugljični čelici	Ugljični čelici	Legirani čelici
Simbol na prvom mjestu		0	1	1 C % f l
	Simbo l	Nazivna vlačna čvrstoća		2 Si 0,60 1 3 Mn 0,80 1
Simbol na drugom mjestu	0 1 2 3 4 5 6 7	neutvrđene čvrstoća do 320 MPa 330 – 350 MPa 360 – 380 MPa 390 - 480 MPa 490 - 580 MPa 590 – 680 MPa 690 - 780 MPa 790 – 880 MPa > 890 MPa	Brojčani simbol označavaju 10 x max sadržaj C zaokružen na deseticu; 10 x C%	4 Cr 0,30 4 5 Ni 0,30 4 6 W 0,10 7 7 Mo 0,08 14 8 V 0,10 17 9 Co 0,10 20 Ti 0,05 30 Cu 0,40 1 Al 0,10 1
Simbol na trećem, četvrtom i petom mjestu	Redni broj i to: 0 – 44 čelici s negarantiranim kemijskim sastavom 45 – 79 čelici s utvrđenim P, S (C, Si, Mn) 80 – 99 čelici s utvrđenim P, S (C, Si, Mn + mikrolegirajući element)		Redni broj i to: 0 - 19 namijenjeno toplinskoj obradbi 20 - 29 za cementaciju 30 - 39 za poboljšanje 40 - 59 ugljični i legirani čelici za alate 60 - 69 s posebnim fizičkim svojstvima 70 - 79 kemijski postojani i vatrootporni čelici 80 - 89 brzorezni čelici 90 - 99 čelici za automate	47

■ Tablica 2.13: Dopunska oznaka

Brojčani simbol	Stanje čelika
0	Bez određene toplinske obradbe
1	Žareno
2	Žareno na najbolju obradivost
2A	Toplinska obradba na određenu vlačnu čvrstoću
2B	Toplinska obradba na feritoperlitnu strukturu
2C	Pogodno za rezanje u hladnom stanju
2D	Žareno na globularni cementit
3	Normalizirano
4	Poboljšano
5	Vučeno, hladno deformirano
6	Ljušteno
7	Brušeno
8	Kontrolirano hladeno
8A	Gašeno
8B	Termomehanički obrađeno
9	Obrađeno po posebnim uputama
K	Za vruće kovanje i prešanje
H	Za hladno oblikovanje valjcima – profiliranje
S	Za hladno savijanje
V	Za vučenje
Z	Za izradu šavnih cijevi

2.5.3. Označivanje čelika bojom

- Označivanje čelika bojom koristi se za lako razlikovanje jedne vrsta čelika od druge i za lakše rukovanje u skladištima i radionicama.
- Oznaka čelika bojom sastoji se, kao i brojčana oznaka, od dva dijela, i to:
 - od **osnovne oznake** koja se sastoji od četiri trake a dobije se zamjenom brojčanih simbola osnovne brojčane oznake čelika za odgovarajuće boje.
 - od **dopunske oznake** koja se sastoji od jedne ili dvije trake, a dobije se zamjenom brojčanih simbola dopunske brojčane oznake. Dopunska oznaka se upotrebljava za označivanje stanja čelika (npr. vučeno, žareno itd.).

Sukladnost boja i brojčanih oznaka navedena je u sljedećoj tablici 14:

■ **Tablica 2.14**

Brojčani simbol	Odgovarajuća boja
0	Crna
1	Bijela
2	Crvena
3	Narančasta
4	Žuta
5	Zelena
6	Plava
7	Ljubičasta
8	Smeđa
9	siva

Usporedne oznake čelika prema EN, HRN i kod nas često korištenoj DIN normi prikazano je u tablici 2.15.

Tablica 2. 15: Usporedne oznake za neke čelike

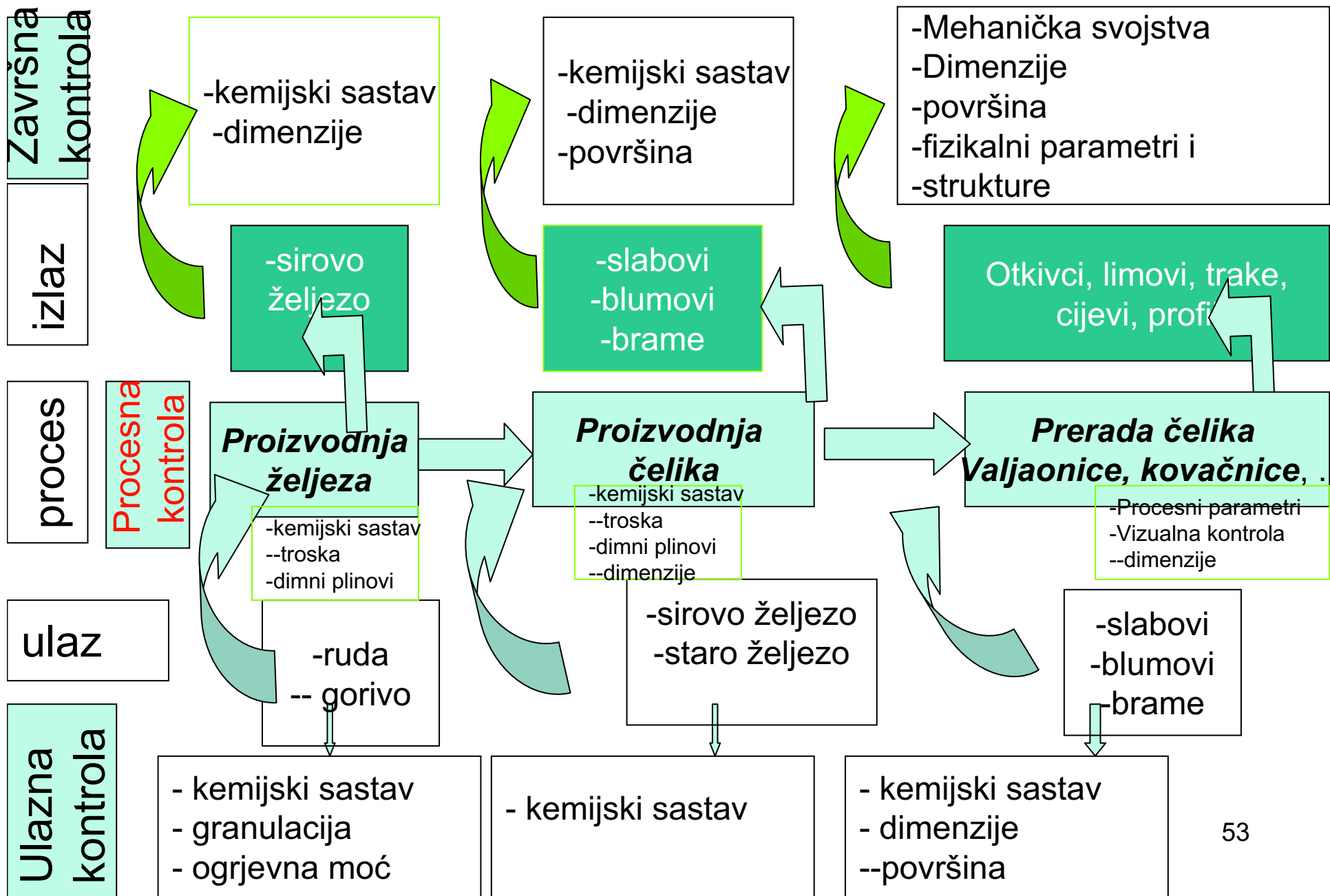
EN 10027-1	HR	DIN
S275JR	Č.0451	St 44-2
S355J2G3	Č.0563	St 52-3
E335	Č.0645	St 60-2
C15E	Č.1221	Ck 15
C22	Č.1330	C22
C35E	Č.1431	Ck 35
C45E	Č.1531	Ck 45
C60E	Č.1731	Ck60
28Mn6	Č3135	28Mn6
51CrV4	Č4830	50CrV4
30CrNiMo8	Č.5432	30CrNiMo8
46Cr2	Č.4133	46Cr2
20MoCr4	Č.7420	20MoCr4
22CrMoS3-5	Č.74201	22CrMoS3-5

2.6. ORGANIZACIJA I KONTROLA KVALITETE U METALURŠKOJ PRAKSI

Sukladno prihvaćenoj normizaciji (ISO, IEC...), u svakoj fazi procesa primjenjuju se odgovarajuće norme za:

- sirovine koje ulaze u proces
- proces
- proizvod
- opremu
- izobrazbu djelatnika

Ispitivanje materijala u svakoj fazi procesa provodi se sukladno sljedećoj shemi:



- Ulazna kontrola
- Procesna kontrola
- Završna kontrola

2.6.1. Ulazna kontrola

- Zadatak ulazne kontrole je da prema važećim normama, tehničkim uvjetima i normativima na reprezentativnim uzorcima provodi kontrolu sirovina i ostalih materijala koji ulaze u proces.
- Osim toga ulazna kontrola pokreće postupak arbitraže ako atest dobavljača i rezultati vlastitih ispitivanja nisu suglasni.

- Ulazna kontrola treba za svaki proizvod ili grupu proizvoda sukladno važećim normama definirati:
 1. frekvenciju uzorkovanja
 2. izbor mjesta uzimanja uzorka
 3. broj uzoraka
 4. metode uzorkovanja
 5. metode pripreme uzoraka
 6. metode ispitivanja

2.6.2. Procesna kontrola

- Da bi se osigurala stabilnost procesa provodi se periodička kontrola po relevantnim fazama procesa s definiranom frekvencijom.
- **Metode i postupci:**
 1. vizualna inspekcija
 2. inspekcija optičkim pomagalicama
 3. kontrola parametara koji se mjere konstantno tijekom procesa
 4. pojednostavljena dimenzijska mjerenja
 5. jednostavna laboratorijska mjerenja

- Metode mjerenja mogu se podijeliti na:
 1. apsolutne metode mjerenja
 2. komparativne metode
 3. Neizravne metode

- Svako utvrđeno odstupanje od unaprijed definiranih parametara procesa zahtijeva brzu odluku o:
 1. korekciji procesnih parametara
 2. zaustavljanje procesa
 3. postupanje s proizvodima koji su nastali s izmijenjenim procesnim parametrima

2.6.3. Završna kontrola

- Zadatak završne – izlazne kontrole je provesti ispitivanja proizvoda sukladno normi za taj proizvod.
- Voditi računa o organizaciji ispitivanja u laboratoriju sukladno normi.
- Izdati atest za proizvod.
- Voditi računa o nesukladnim proizvodima.

3. PREGLED METODA ISPITIVANJA

- Fizikalna, kemijska i fizikalno-kemijska svojstva metala na kojima se temelje instrumentalne metode analize:
 1. ekstenzivne veličine
 2. mehanička svojstva
 3. toplinska svojstva
 4. električna svojstva
 5. nuklearna svojstva
 6. svojstva koja uključuju interakciju materijala i zračenja

1. Ekstenzivne veličine
 - masa i dimenzije
2. Mehanička svojstva – elastičnost, kvazistatička naprezanja (vlak, tlak, uvijanje, smicanje), tvrdoća, brzina širenja zvuka i td..
3. Toplinska svojstva - toplinska provodljivost, toplina kemijske reakcije i toplinski efekti faznih prijelaza
4. Električna svojstva - električna provodljivost, polarografija, potenciometrija i dielektrička konstanta
5. Nuklearna svojstva - radioaktivnost, masa izotopa i apsorpcija nuklearnog zračenja
6. Svojstva koja uključuju interakciju materijala i zračenja
 - emisija, apsorpcija i rasipanje zračenja, rotacija polarizirajućeg zračenja, nuklearna i elektromagnetska rezonanca, indeks loma i pojava difrakcije svjetla

Izbor metode ispitivanja ovisi o:

- **Svrsi**

- ulazna kontrola
- kontrola procesa
- završna kontrola i certifikacija

- **Veličini i obliku uzorka**

- čvrsti materijali (sipki ili kruti uzorci)
- plinovi

- **Traženoj točnosti rezultata**

- **Potrebnoj brzini informacije**

Uzorkovanje i problem izbora reprezentativnog uzorka

- Uzimanje, obradba i priprema uzoraka je vrlo bitna faza koja prethodi samom ispitivanju.
- Izbor reprezentativnog uzorka često je važniji od same točnosti metode
- U težnji da se dobije reprezentativan uzorak mora se voditi računa o sljedećem:
 - izbor mjesta uzimanja uzorka
 - količina uzorka
 - frekvencija uzorkovanja
 - metode i načinom rezanja kod uzorkovanja

- Metalurški procesi su specifični u odnosu na druge procese zbog:
 - heterogenosti sastava
 - širokog raspona vrijednosti parametara kvalitete
 - kontinuiranosti procesa
 - otežane manipulacije

- Uzorkovanje u procesima crne metalurgije ovisi o:
 - vrsti procesa
 - vrsti ispitivanja
 - metodi ispitivanja

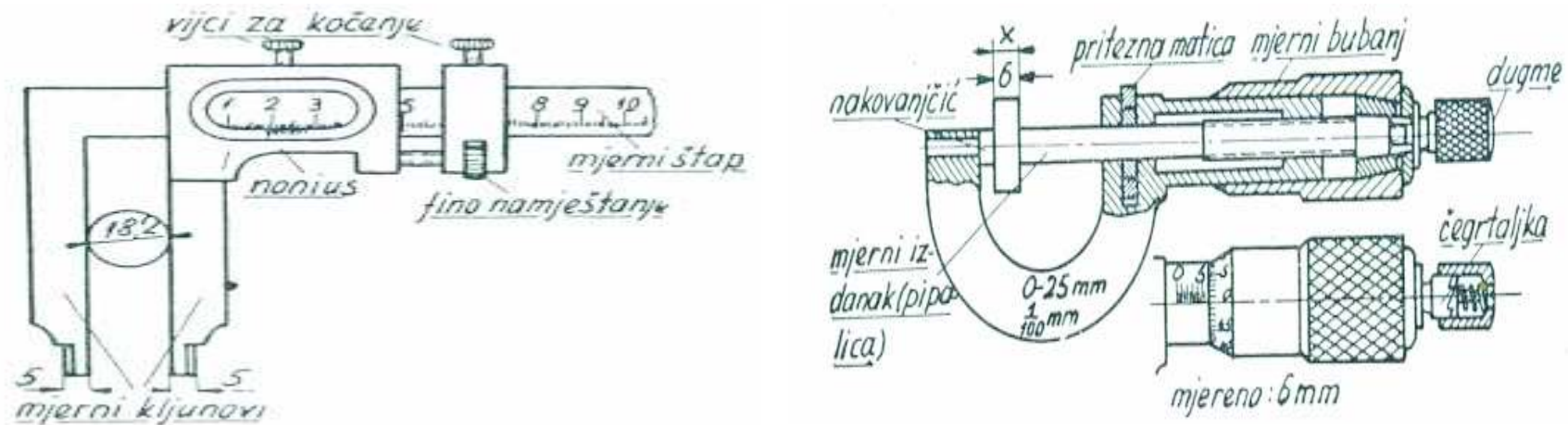
U završnoj kontroli uglavnom su normom točno definirani mjesto uzimanja, broj, učestalost i oblik uzorka

- **Metode ispitivanja**

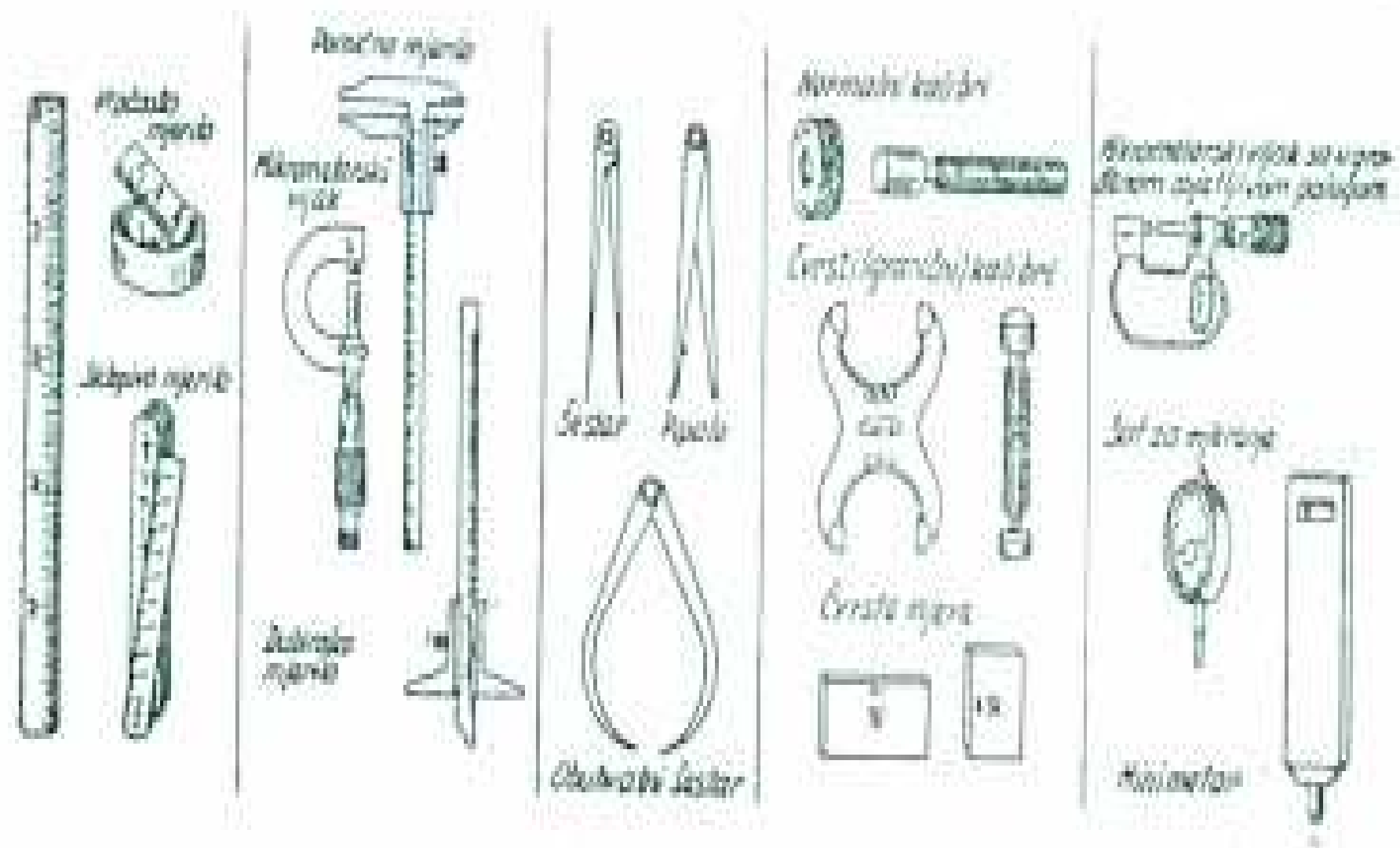
1. Metode ispitivanja dimenzija, oblika i stanja površine
2. Metode ispitivanja kemijskog sastava
3. Metode ispitivanja strukture
4. Metode mehaničkih i tehnoloških ispitivanja
5. Metode ispitivanja toplinskih svojstava
6. Metode ispitivanja materijala bez razaranja
7. Ostale metode

3.1. METODE ISPITIVANJA DIMENZIJA OBLIKA I STANJA POVRŠINE

1. Mjerenje dimenzija:
metri, pomična mjerila, mikrometri, komparateri
2. Ispitivanje kvalitete površine:
hrapavost, vizualna kontrola,



Slika 3.1a: Pregled mjerila za mjerenje dimenzija



Slika 3.1b: Pregled mjerila za mjerenje dimenzija

3.2. METODE ISPITIVANJA KEMIJSKOG SASTAVA

1. Optička spektrometrija
2. Elektrokemijska analiza
3. Rendenska fluorescentna analiza
4. Termometrijska analiza
5. Kromatografija

Određivanje plinova u čeliku

- tijekom procesa proizvodnje
- gotov proizvod
- kisik, dušik i vodik

U metalima i legurama plinovi se nalaze kao:

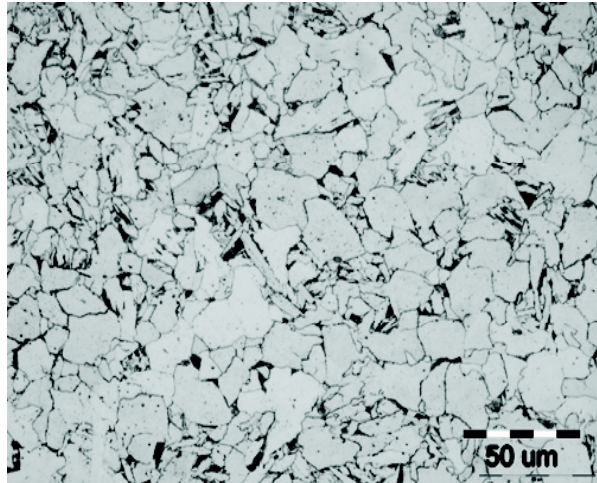
1. plinski uključci
2. kemijski spojevi (oksidi, nitridi i hidridi)
3. otopine
4. apsorbirani tanki slojevi na površini metala

3.3. METODE ISPITIVANJA STRUKTURE

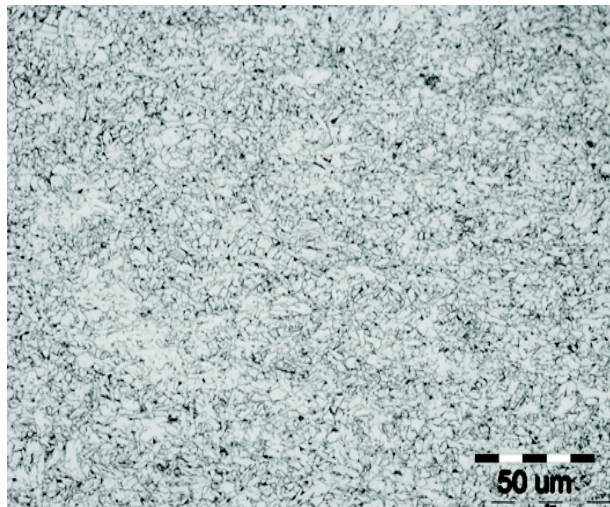
- Metalografska mikro i makro struktura
- Rendgenska difrakcijska strukturna mikroanaliza
- Elektronska mikroanaliza

3.3.1. Metalografska mikroanaliza:

- određivanje oblika i veličine zrna
- određivanje sadržaja i rasporeda uključaka u čeliku

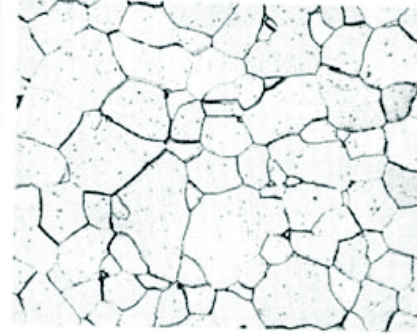


sitno zrno

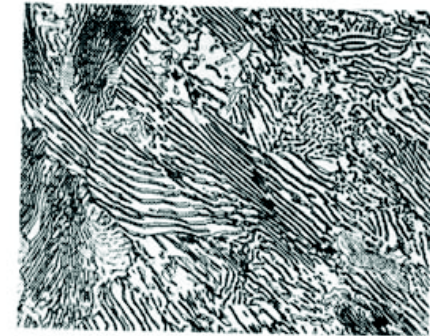


krupno zrno

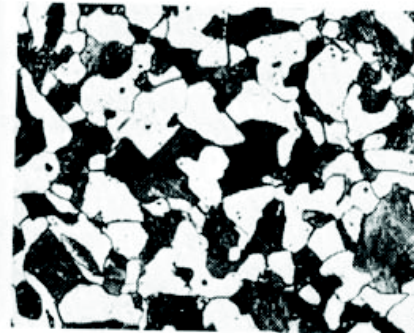
Slika 3.2. Određivanje veličine zrna



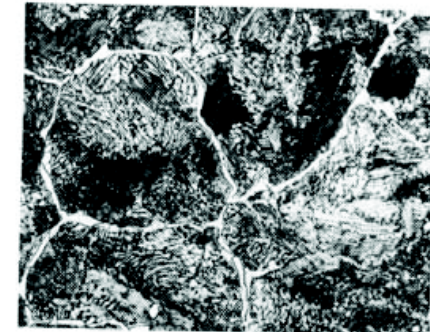
Ferit (500 : 1)



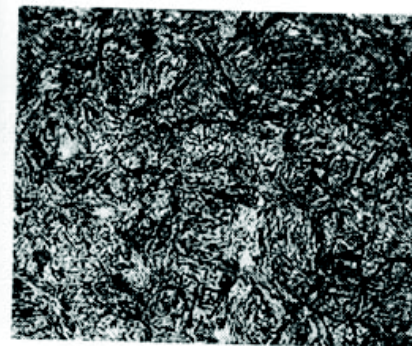
Perlit (500 : 1)



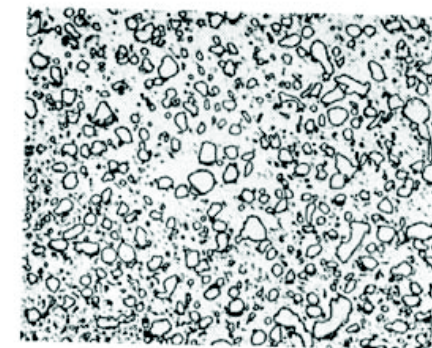
Ferit i perlit 0,35% C (500 : 1)



Perlit i cementit 1,1% C (500 : 1)



Martenzit (500 : 1)



Zrnati cementit (500 : 1)

Tablica 3.1: Metode određivanja raspodjele, sastava i strukture uključka u čeliku

Metoda	Oblik uzorka	Veličina uključka/ μm	Rezultat analize/ μm
Metalografija	izbrusak	0,5	vrsta, raspored i veličina
Kemijske metode	talog	1-50	sastav
Rendgenske metode	odvojeni uključci	30-60	fazna analiza
Elektrografska ispitivanja	izbrusak talog	10	struktura
Elektronska mikrosonda	izbrusak	0,005	raspored elemenata u uključku
Elektronska mikroskopija	replika folija	nekoliko nanometara	raspored, veličina, struktura i sastava

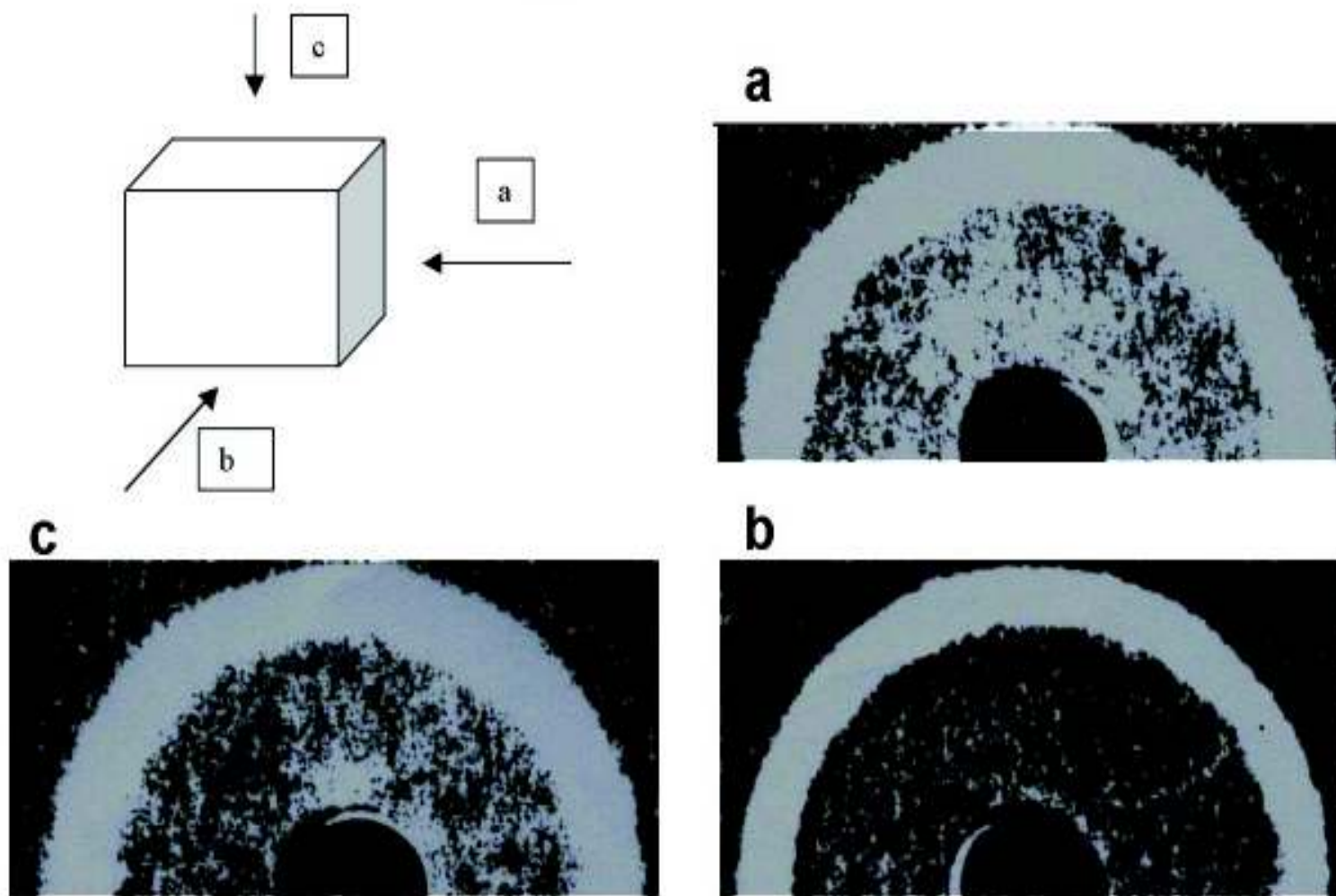
3.3.2. Rendgenska difrakcijska strukturalna mikroanaliza

- **Rendgenska difrakcija**
- **Elektronski mikroanalizatori**
- **Transmisijska elektronska mikroanaliza**

- **Rendgenska difrakcija**

Metoda se bazira na difrakciji rendgenskih zraka i njihovoj refleksiji na plohama kristala, odnosno međusobnom djelovanju rendgenskih zraka i elektrona atoma rendgenske zrake na svom putu kroz kristal predaju energiju koja se regenerira kao elektromagnetski valovi

Rendgenska strukturna analiza

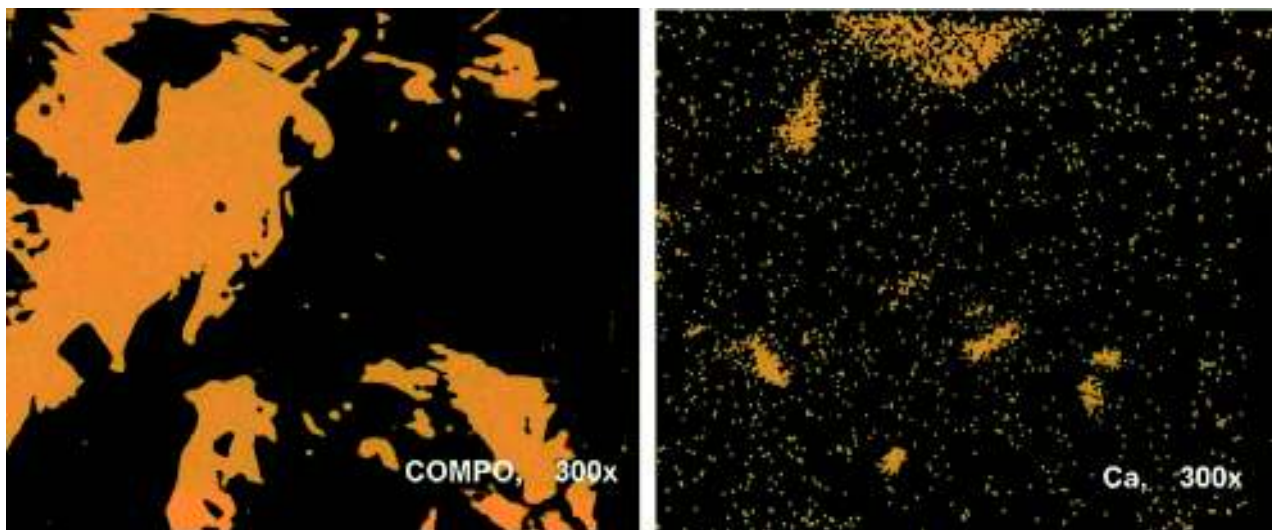


Slika 3.3. Rendgenska strukturna analiza

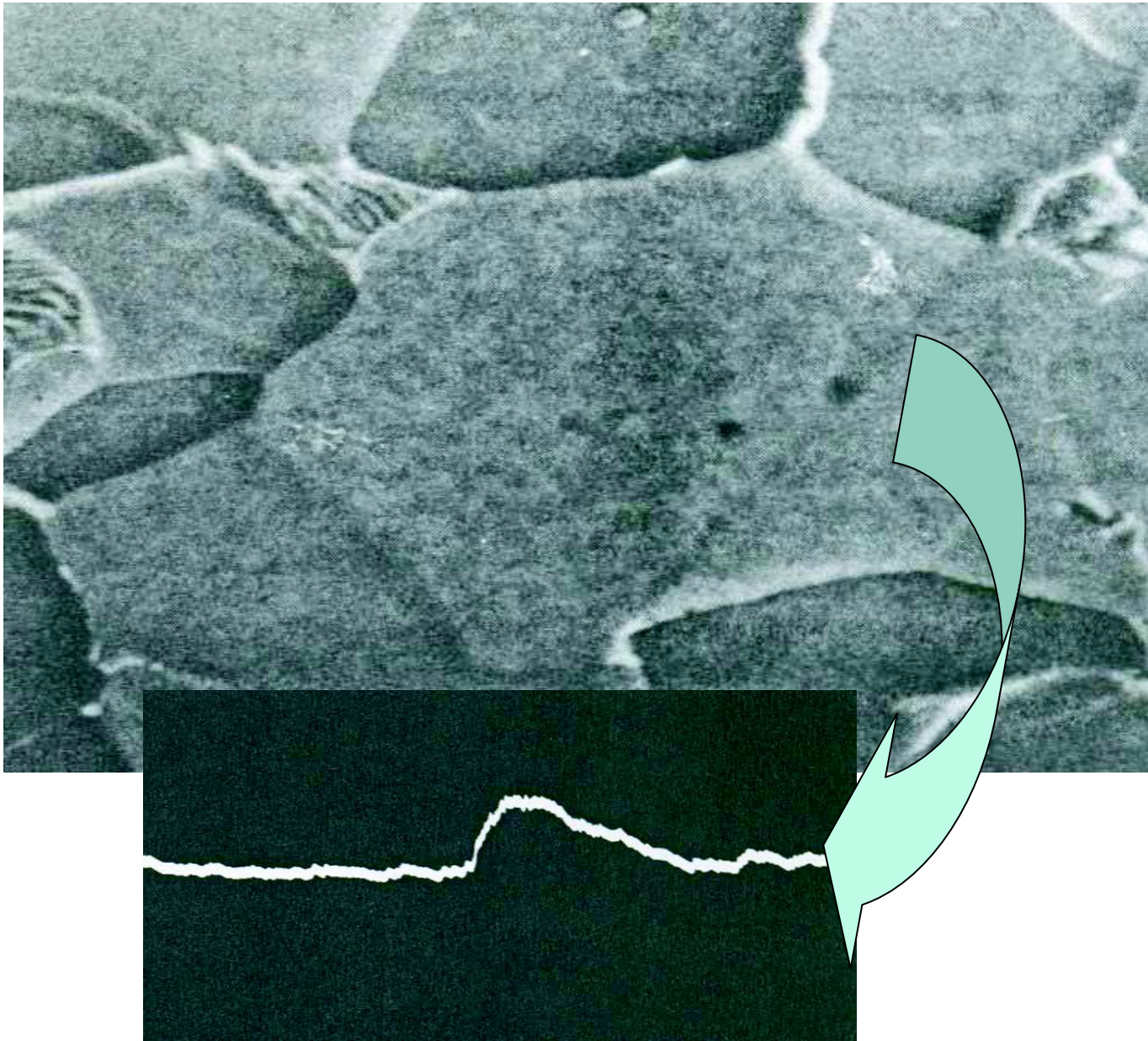
3.3.3. Elektronski mikroanalizatori

Mogu se uspješno primjenjivati u sljedećim područjima:

1. ispitivanje mikrostrukture
2. ispitivanje mikrosegregacija
3. ispitivanje difuzije
4. ispitivanje tankih slojeva



Slika 3.4: Mikrosegregacije u varu cijevi

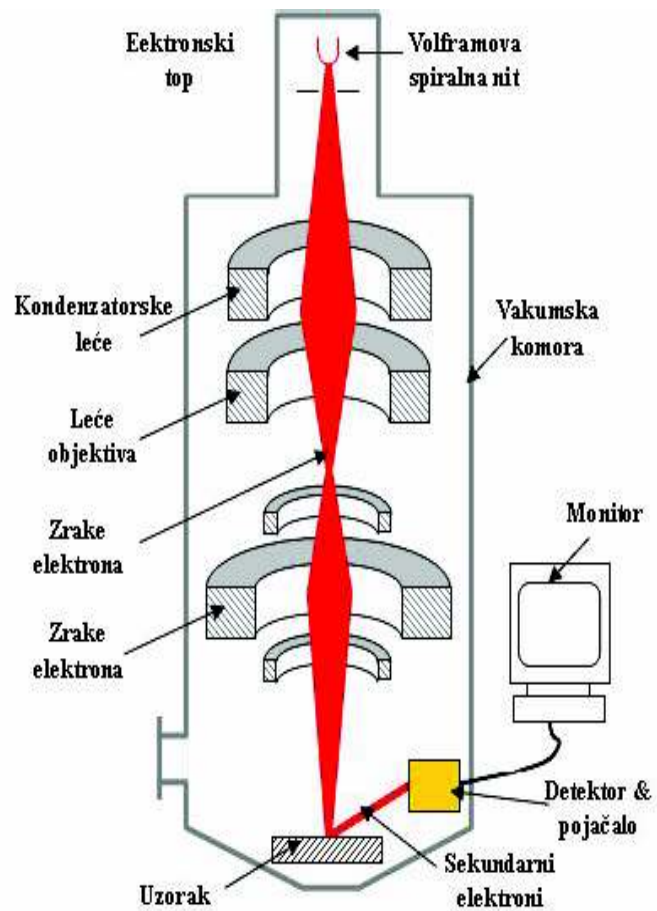


Slika 3.5: Identifikacija niobijeva karbonitrida

3.3.4. Transmisijska elektronska mikroanaliza

- To je metoda koja se koristi za istraživanje substrukturnih promjena u metalu.
- Prozračuje se folija ili replika.
- Promatra se struktura pri vrlo velikim povećanjima.
- Difrakcijskom tehnikom mogu se identificirati substrukturni konstituenti.

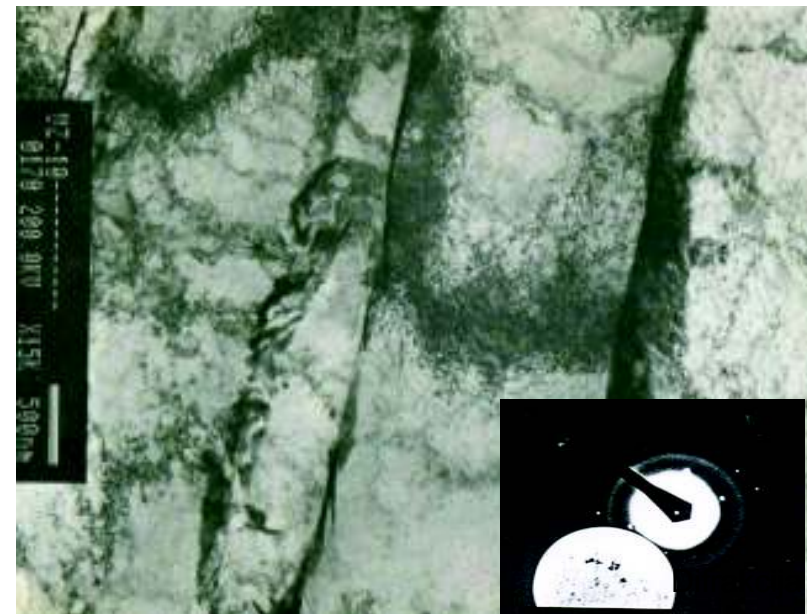
- Elektronskom difrakcijom utvrđuje se tip i kristalografske karakteristike izdvojenih čestica.



Slika 3.6: Shema transmisijskog elektronskog mikroskopa



Slika 3.7: TEM na uzorku replike



Slika 3.8: TEM na uzorku folije i difrakcija precipitata

3.4. METODE MEHANIČKIH I TEHNOLOŠKIH ISPITIVANJA

- Statička i dinamička ispitivanja
- Kratkotrajna i dugotrajna
- Ispitivanja na sobnim, povišenim i sniženim temperaturama
- Ispitivanje tvrdoće
- Tehnološka ispitivanja

3.5. METODE ISPITIVANJA MATERIJALA BEZ RAZARANJA (DEFEKTOSKOPIJA)

- Vizualne ili optičke metode
- Metode rendgenskog zračenja
- Magnetske metode
- Ultrazvučne metode
- Penetracijske metode

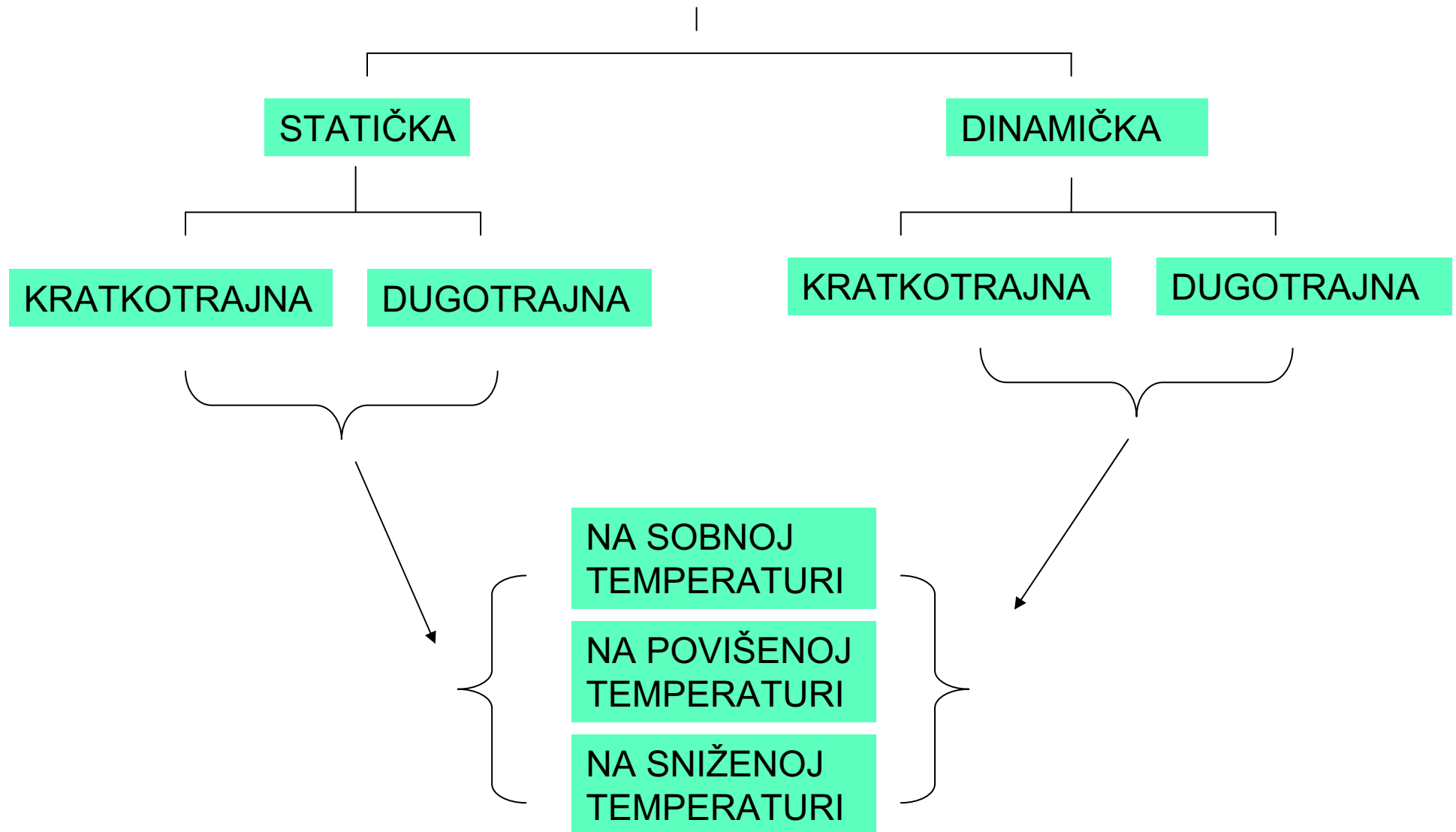
4. MEHANIČKA ISPITIVANJA

Mehanička ispitivanja:

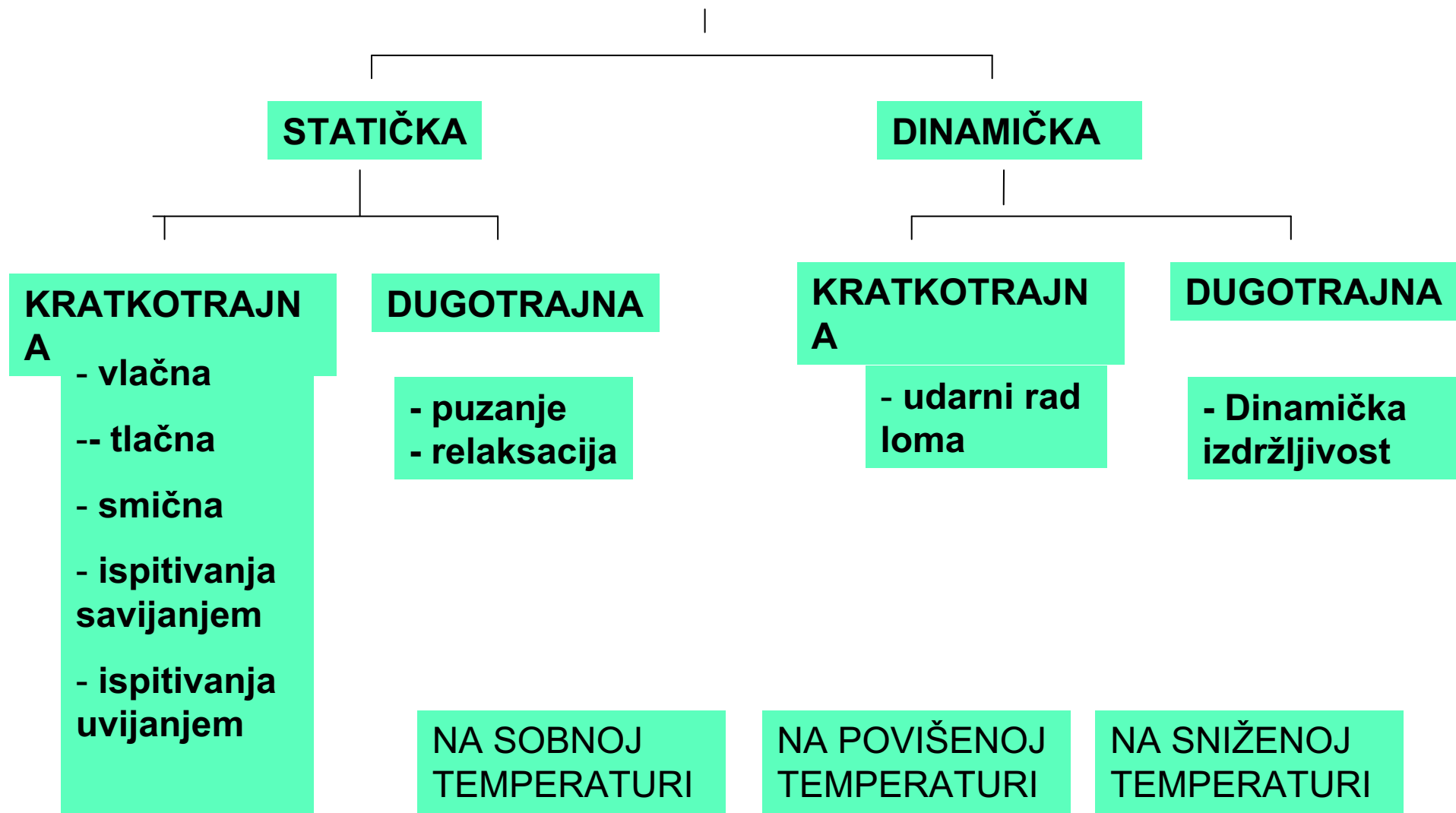
- daju objektivnu ocjenu o kvaliteti materijala
- posljedica su strukturnog stanja metala
- osnova su za proračun i dimenzioniranje strojnih dijelova

- Opća sistematizacija mehaničkih ispitivanja je:
 - a) prema načinu djelovanja opterećenja
 - b) prema brzini djelovanja opterećenja
 - c) prema temperaturi ispitivanja
 - d) prema trajanju djelovanja opterećenja

MEHANIČKA ISPITIVANJA

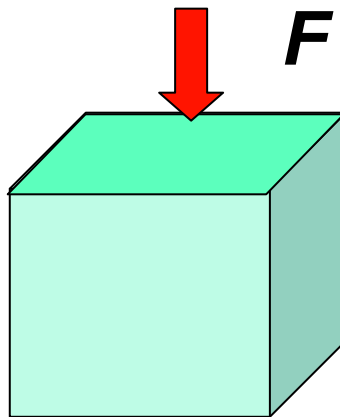


MEHANIČKA ISPITIVANJA



- **Pojam opterećenja**

Opterećenje je ukupna vanjska sila, koja djeluje na cijelu ploštinu presjeka predmeta.



Slika 4.1: Opterećenje

Označava se s F , a izražava se u N.

Prema načinu djelovanja sila, opterećenje može biti statičko, dinamično i kombinirano.

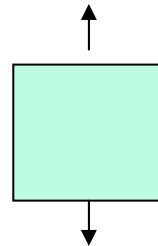
- **Statičko opterećenje**, je vrsta opterećenja kod kojeg sila djeluje mirno ili se sporo mijenja od neke najmanje do najveće vrijednosti.

Dinamičko opterećenje je opterećenje, kod kojega sila djeluje udarno ili promjenljivo.

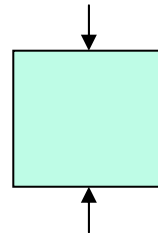
- To su opterećenja strojnih dijelova i konstrukcija koja se teže podnose.
- Za svako takvo opterećenje potrebno je točno odrediti njegovu vrstu, oblik, smjer i veličinu.

- Općenito opterećenja mogu biti:

- vlačna



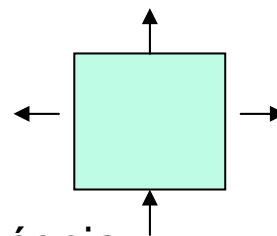
- tlačna



- smična



- kombinacija

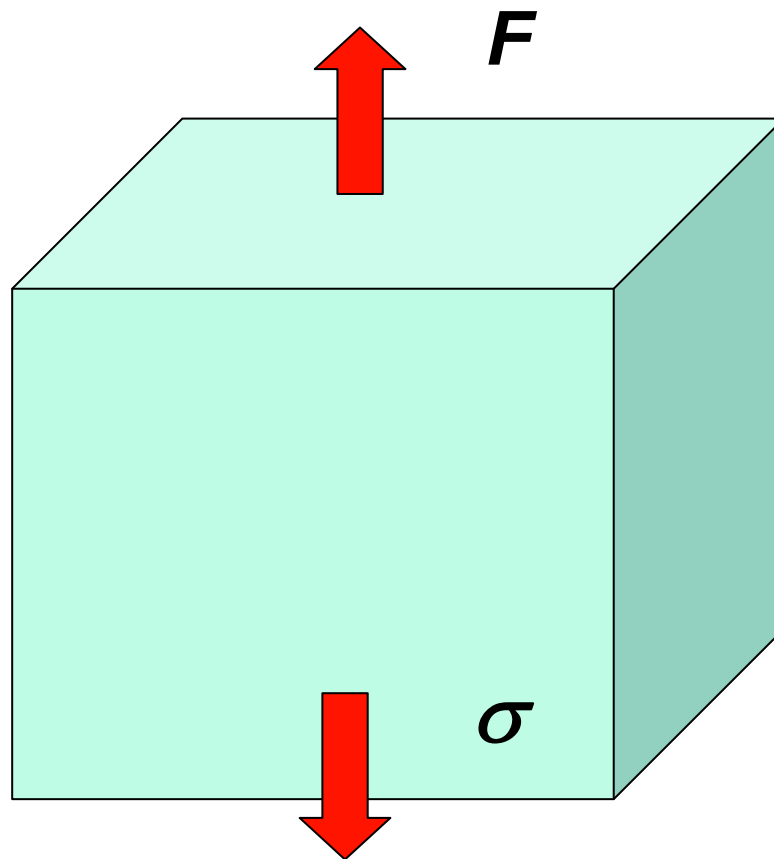


Slika 4.2: Vrste opterećenja

Djelovanju vanjske sile F suprotstavlja se unutarnja sila u materijalu.

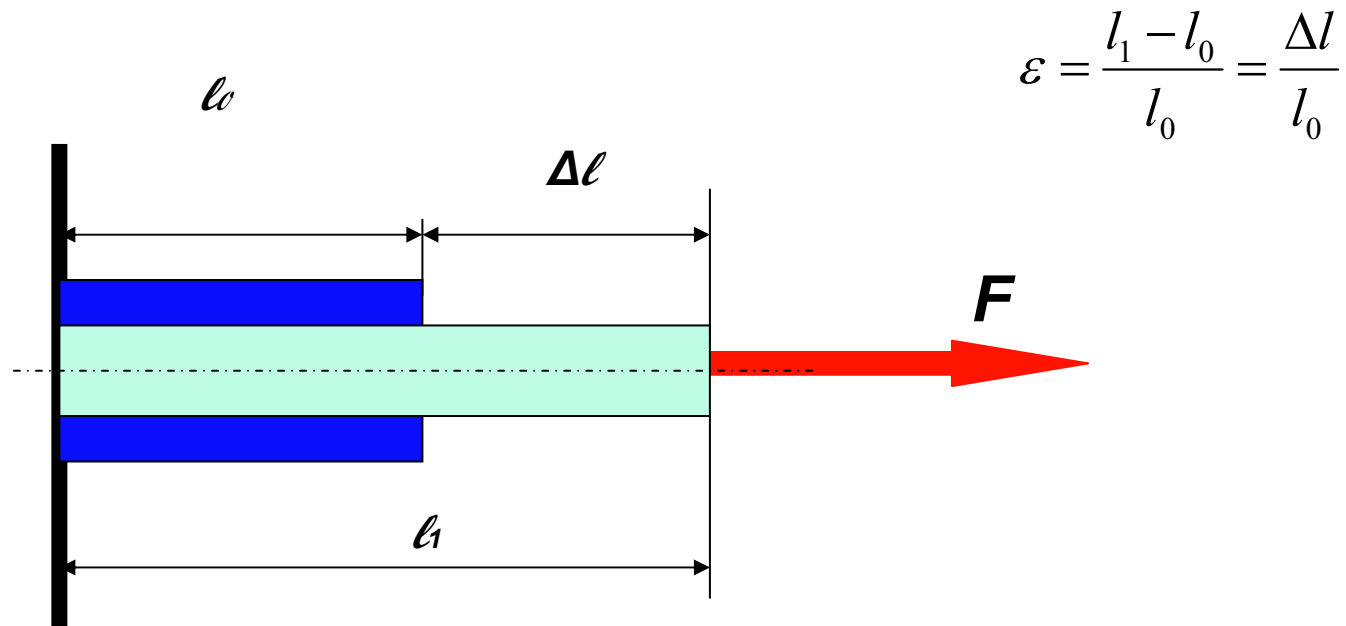
Djelovanje sile po ploštini naziva se naprezanje i izražava prema jednadžbi:

$$\sigma = \frac{F}{S_o} / MPa$$



Slika 4.3: Sila i naprezanje

Promjena dimenzija tijela uslijed djelovanja sile naziva se **deformacija**



Slika 4.4: Deformacija

Svako naprezanje kojem je izloženo čvrsto tijelo izaziva njegovu deformaciju

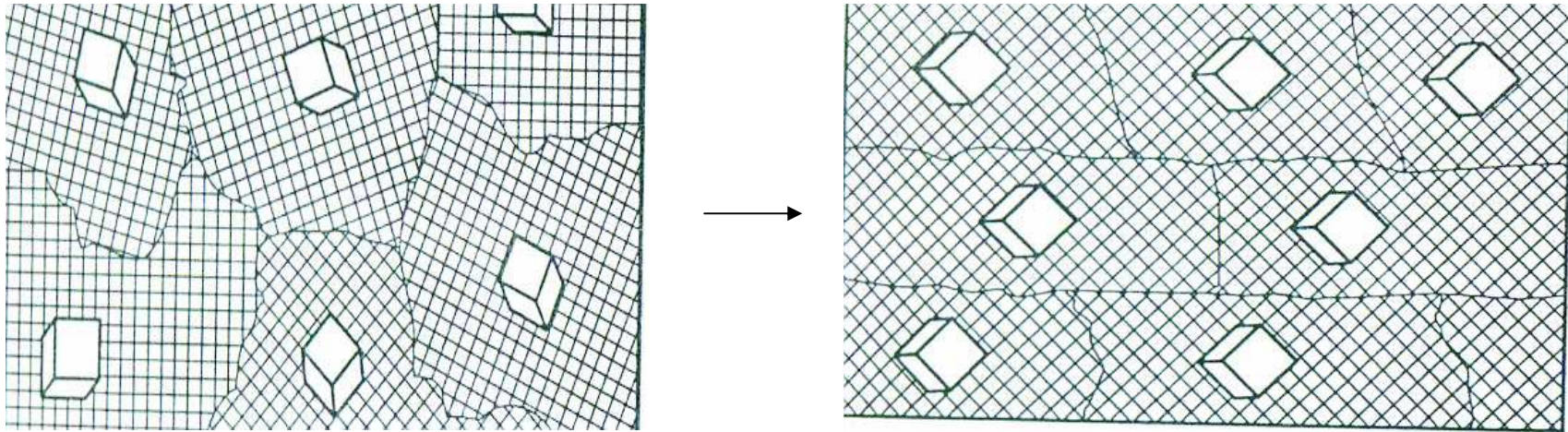
Što se zapravo događa u materijalu uslijed djelovanja sila?



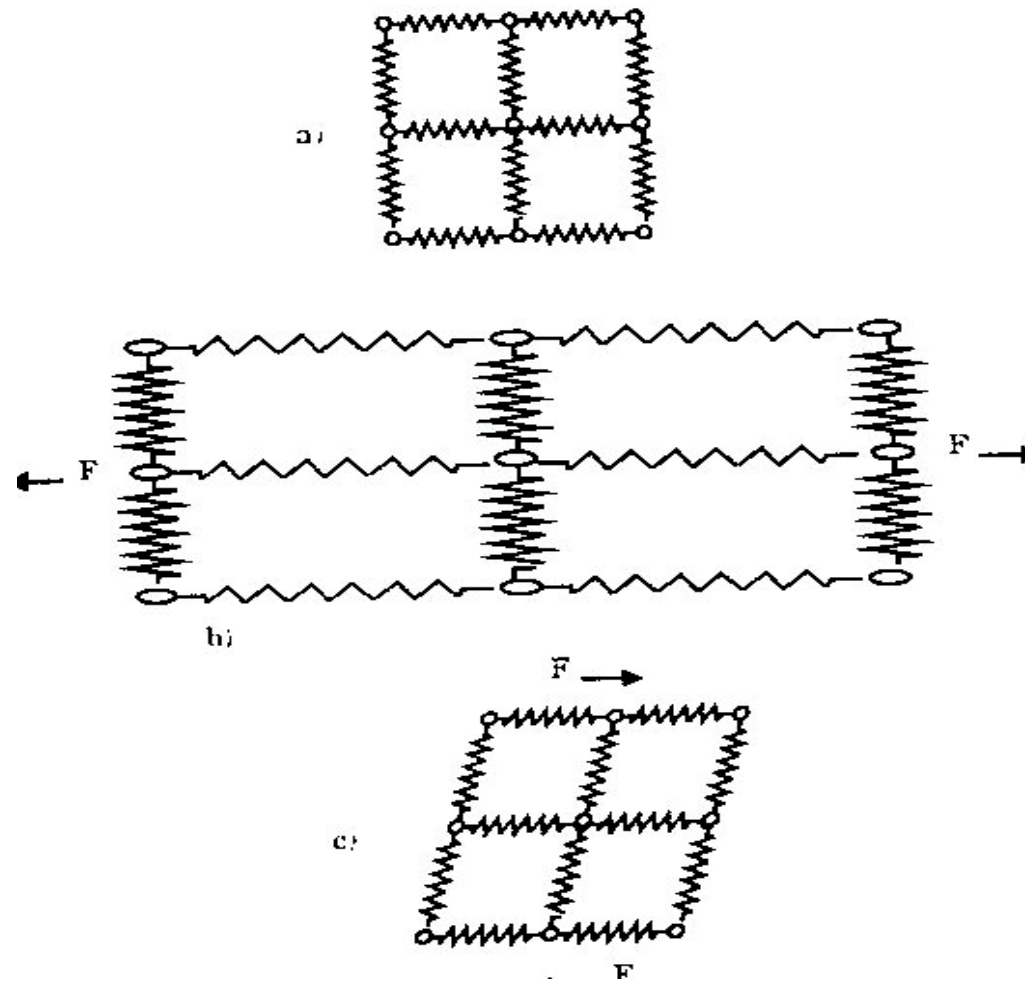
Slika 4.5: Realna struktura



Dolazi do promjene strukture



Slika 4.6: Promjena strukture uslijed djelovanja sile



Slika 4.7: Deformacija kristalne rešetke

- Deformacija se odvija:

- elastično

- visukoelastično



→ Nakon prestanka djelovanja sile, deformacije nestaje

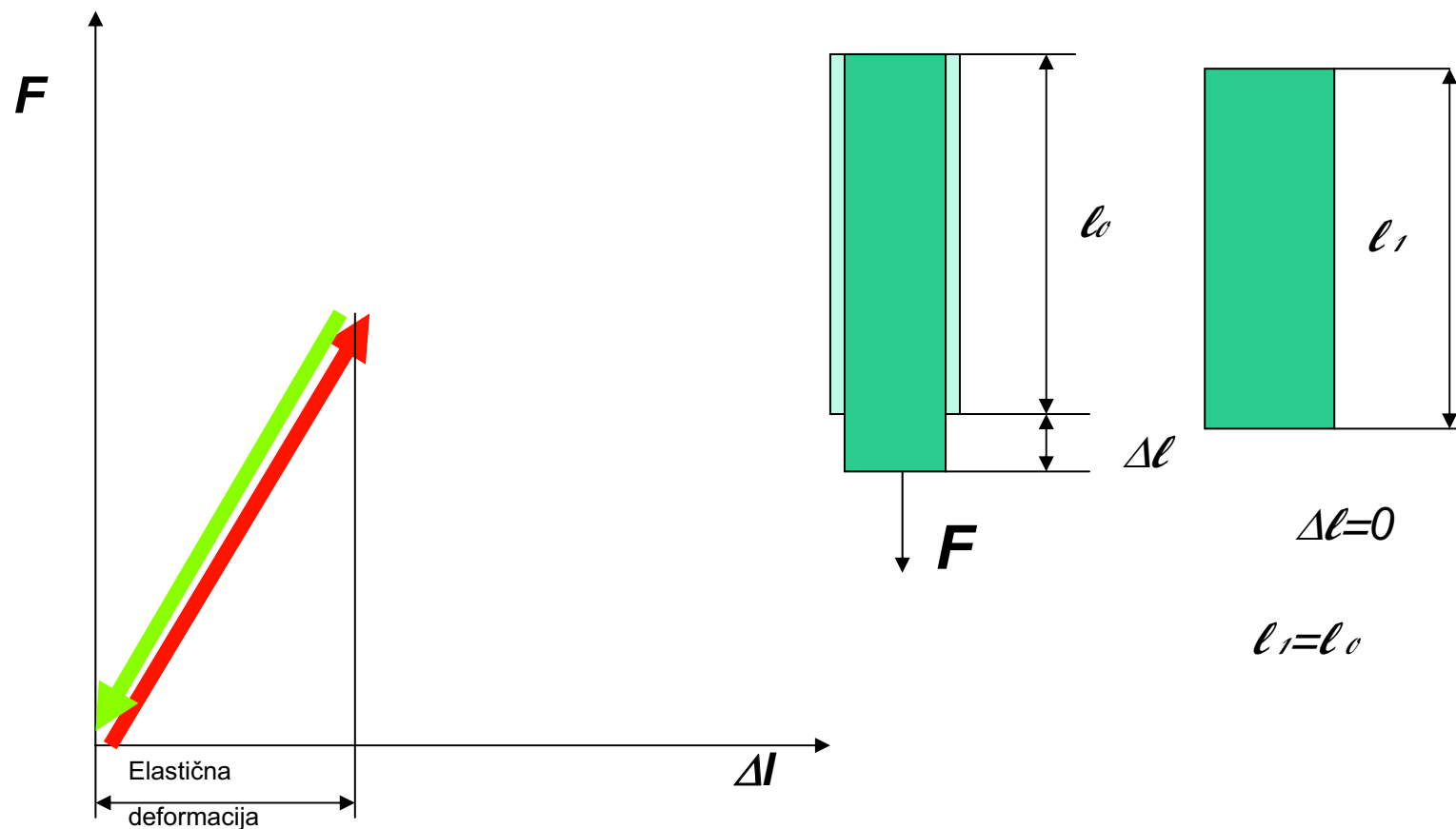
- plastično i

- viskozno



→ Trajna deformacija

- Ovisnost sile i deformacije u materijalu može se prikazati prema dijagramu



Slika 4.8: Elastična deformacija

- Elastična deformacija nastaje u materijalu pri djelovanju vanjske sile a nestaje nakon prestanka djelovanja sile
- Elastična deformacija je prisutna kod svih materijala pri niskim temperaturama u odnosu na temperaturu tališta

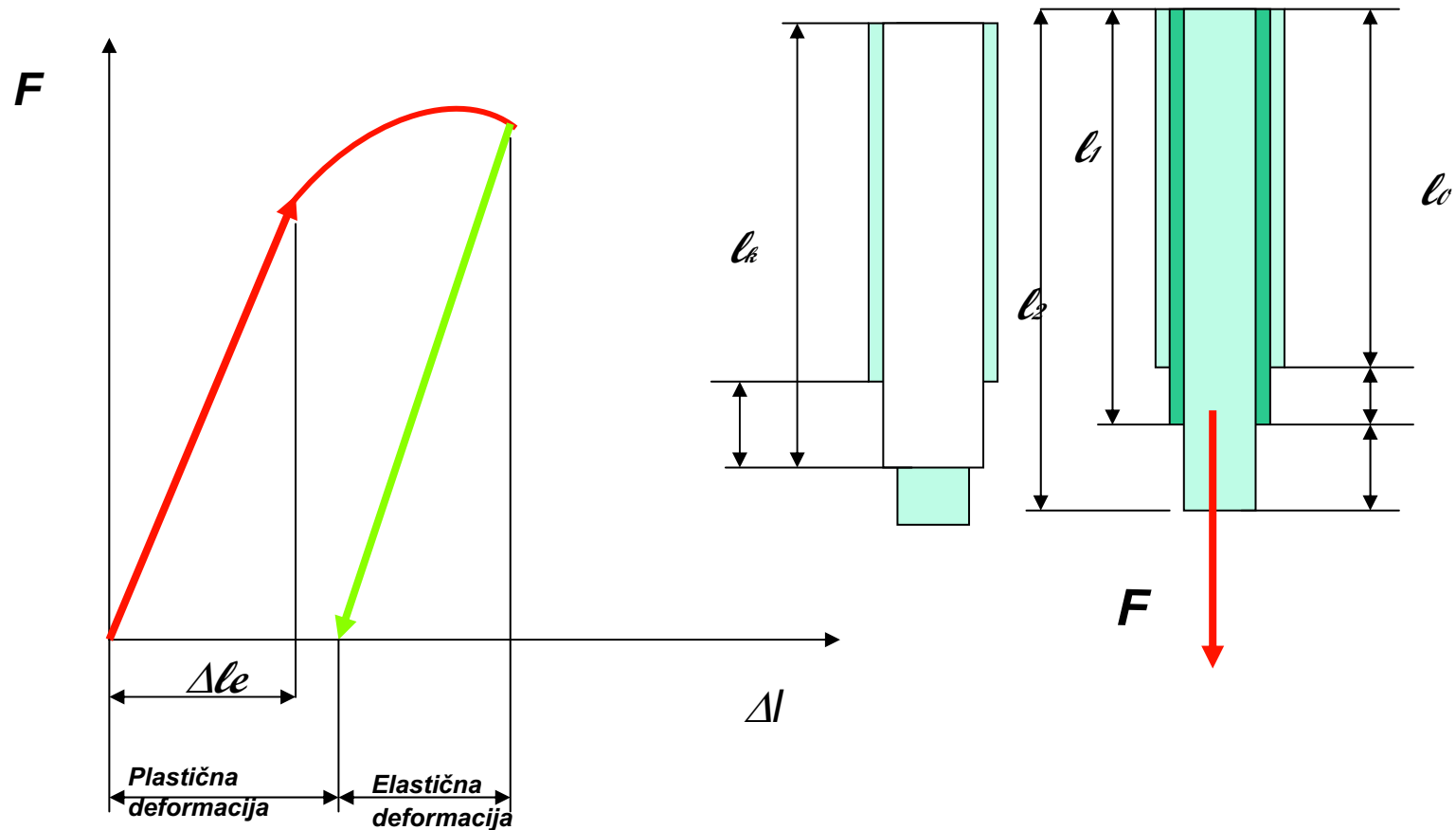
- Kod povećanja sile razvlačenja
- Nakon prestanka djelovanja sile

L_0 – početna duljina

L_e – duljina nakon elastične deformacije

L_1 – duljina kod maksimalnog razvlačenja

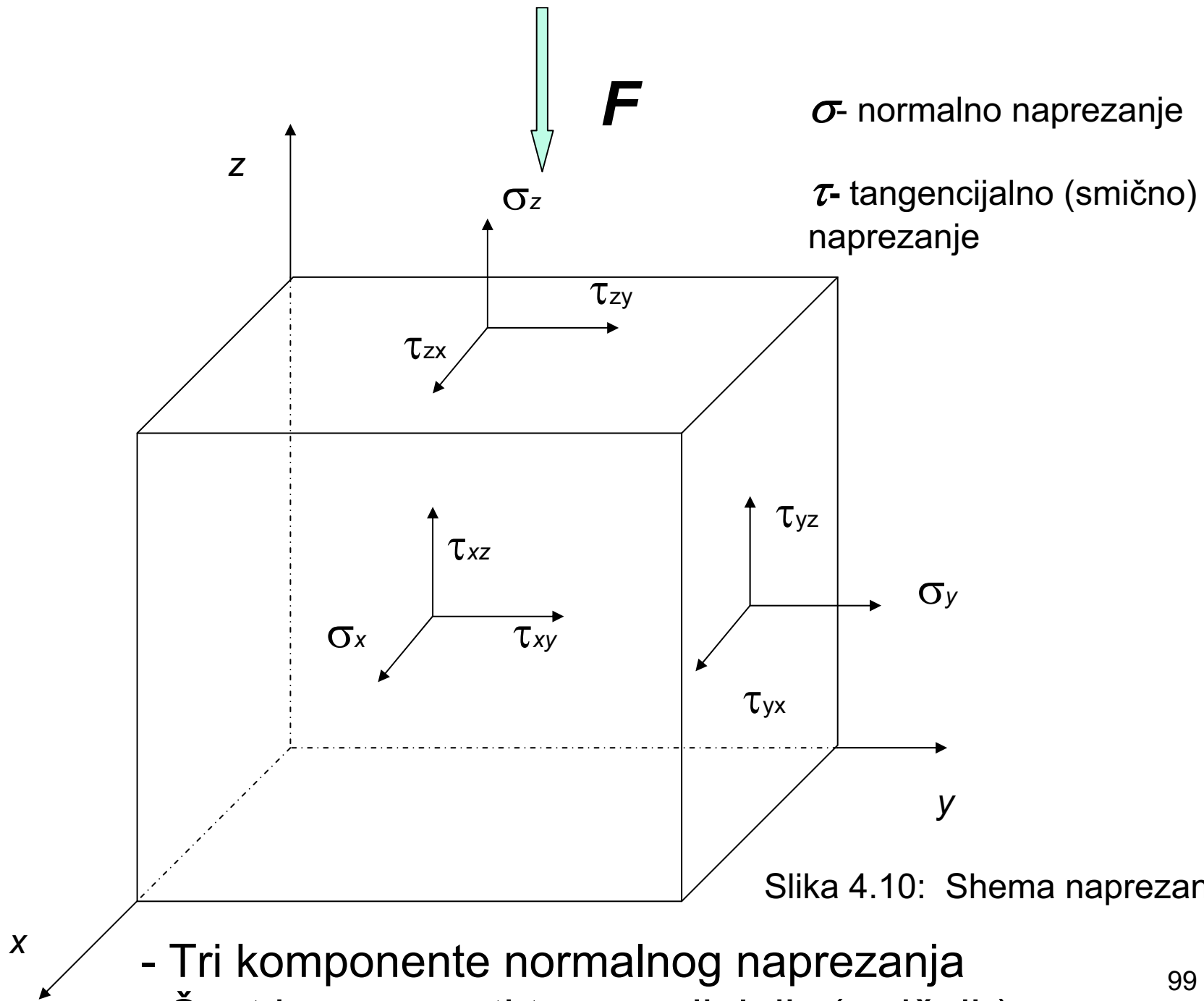
L_2 – duljina nakon prestanka djelovanja elastične deformacije



Slika 4.9: Plastična deformacija

- Plastična deformacija je takva deformacija koja dovodi do trajne promjene oblika i dimenzija deformiranog tijela
- Dominira kod metalnih materijala
- Plastičnu deformaciju provode smična naprezanja

Što su to smična naprezanja?



Slika 4.10: Shema naprezanja

- Tri komponente normalnog naprezanja
- Šest komponenti tangencijalnih (smičnih) naprezanja

Kako se izražava deformacija?

Deformacija ili jedinično istežanje

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

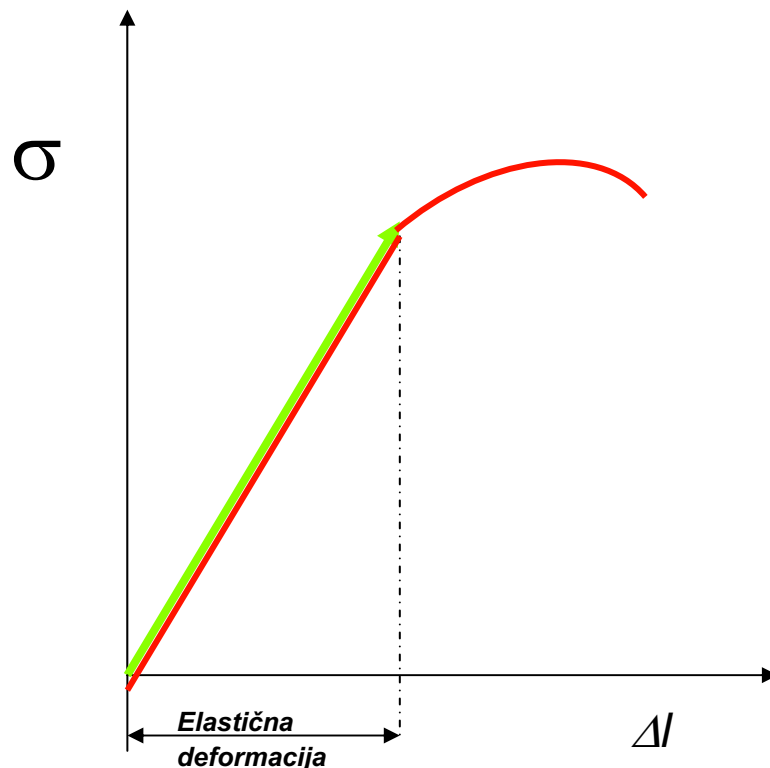
Istezljivost

$$A = \frac{l - l_0}{l_0} \cdot 100 = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100 / \%$$

- Duktilni (rastezljivi) materijalu imaju $\varepsilon > 5\%$
- Krhki materijali imaju $\varepsilon < 5\%$

- **HOOKEOV ZAKON**

- Područje dijagrama u kojem naprezanje i deformacija imaju linearnu ovisnost



Hookeov zakon vrijedi sve dok naprezanje u materijalu ne pređe točku kod koje se počinju mijenjati fizikalna svojstva materijala (granicu proporcionalnosti)

Slika 4.11: Hookeov zakon

U tom području su naprezanje i deformacija izravno proporcionalni

Ovisno o vrsti naprežanja razlikujemo elastične konstante:

- Youngov modul elastičnosti, E
- modul smičnosti, G
- *Volumski modul, K*
- *Poissonov faktor, μ*

- **Youngov modul elastičnosti**

Omjer jednoosnog naprezanja σ i deformacije ε u istom smjeru

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} / MPa$$

E – predstavlja koeficijent smjera Hookeova pravca
a određuje se eksperimentalno pri vlačnom
ispitivanju

■ **Modul smičnosti:**

■ predstavlja omjer smičnog naprezanja τ i smične deformacije γ

$$G = \frac{\tau}{\gamma} / MPa$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} / MPa$$

■ određuje se eksperimentalno preciznim mjerenjem kuta zaokreta pri torziji

■ kao i modul elastičnosti ovisi o vrsti materijala

Ovisi o vrsti materijala odnosno atomskoj vezi; što je veza jača veći je modul elastičnosti i modul smičnosti i obrnuto.

Tablica 4.1:

Vrijednosti modula elastičnosti za neke metalne materijale i njihove legure

<i>Materijal</i>	<i>E/MPa</i>
materijal	E, N/mm ²
čelik	210000
sivi lijev *	110000-160000
Cu i Cu-legure	105000
Al i Al-legure	70000

4.1. STATIČKA ISPITIVANJA

4.1.1. Kratkotrajna Ispitivanja

4.1.1.1 Statički vlačni pokus

4.1.1.2. Statički tlačni pokus

4.1.1.3. Smična ispitivanja

4.1.1.4. Ispitivanja savijanjem

4.1.1.5. Ispitivanja uvijanjem

4.1.2. Dugotrajna Ispitivanja

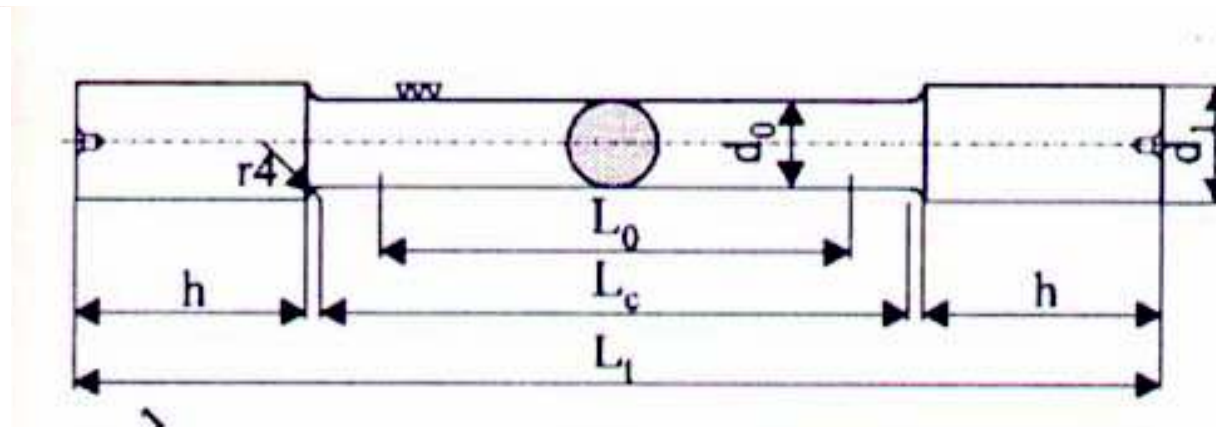
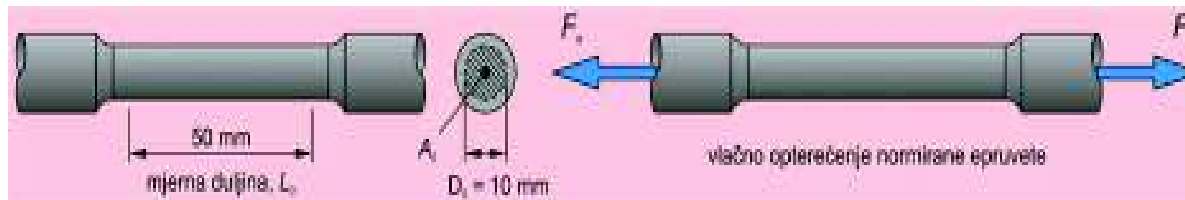
4.1.1. Kratkotrajna ispitivanja

4.1.1.1. Statički vlačni pokus

- Statičkim vlačnim pokusom određuje se ponašanje materijala u uvjetima jednoosnog statičkog vlačnog naprezanja
- Ovim ispitivanjem utvrđuju se ujedno osnovna mehanička svojstva materijala koja karakteriziraju njegovu otpornost i deformabilnost kao što su granica razvlačenja, vlačna čvrstoća, istezljivost, suženje i td..

4.1.1.1.1. Ispitni uzorci

- Statički vlačni pokus provodi se, ovisno o obliku poluproizvoda odnosno debljini stjenke, na ispitnim uzorcima okruglog ili pravokutnog poprečnog presjeka.
- Ispitni uzorci su posebno izrađeni iz izabраних uзорaka ispitivanog materijala u određenim tehničkim ili standardnim oblicima i dimenzijama, shodno važećoj normi.



Slika 4.12: Ispitni uzorak za statički vlačni pokus

d_0 , mm - početni promjer ispitnog uzorka;

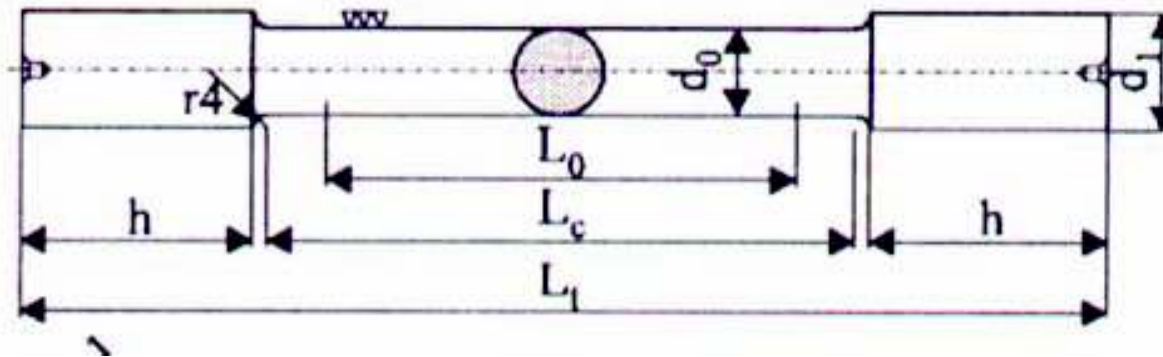
L_0 , mm - početna mjerna dužina ispitnog uzorka;

h , mm – dužina "glave" ispitnog uzorka;

L_t , mm – ukupna dužina ispitnog uzorka;

S_0 , mm² – ploština početnog presjeka ispitnog uzorka.

Svaki ispitni uzorak sastoji se od: mjernog (L_0), prijelaznog i steznog (h) dijela



Slika 4.13: Glavni dijelovi ispitnog uzorka

- **Mjerni dio ispitnog uzorka (L_0)** – je srednji, glatki dio ispitnog uzorka na kojem se izvode, prate i mjere njene deformacije i kidanja, te se provjeravaju važnije mjere ispitnog uzorka prije početka i na kraju ispitivanja.

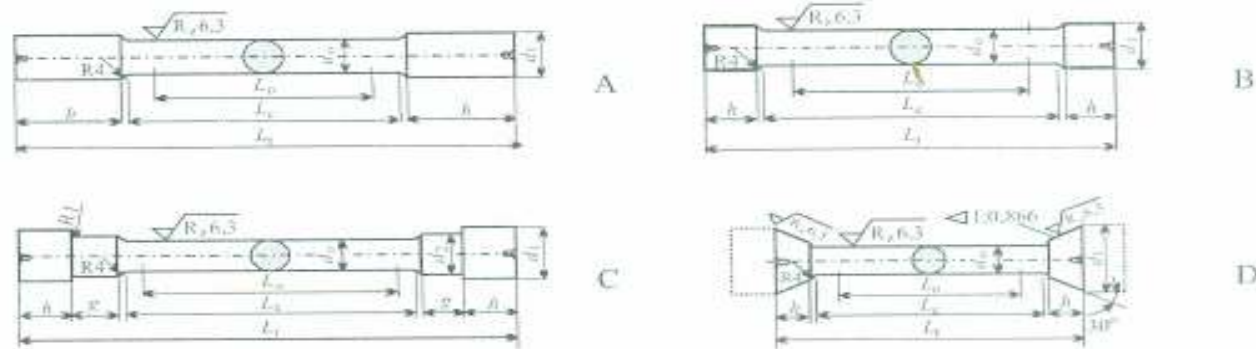
- **Standardni ispitni uzorci** imaju standardom propisane oblike i dimenzije

Mogu biti:

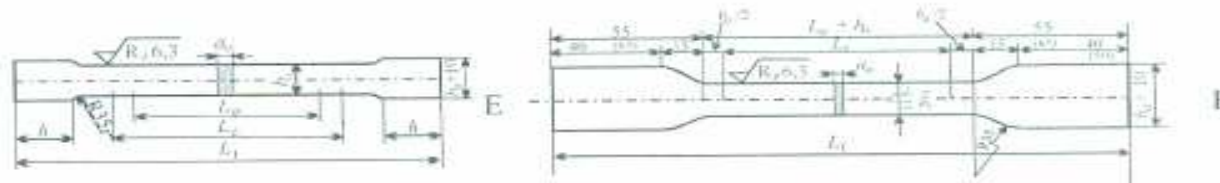
- normalne ili
- proporcionalne

Isto tako:

- okrugle
- plosnate



a) okrugli ispitni uzorci (tipovi A, B, C, D)



b) plosnati ispitni uzorci (tip E bez i s izmjerama za glave)

- Tablica 4.2: Tipovi ispitnih uzoraka

Tip ispitnog uzorka	d_0 ili $a \times b / mm$	Početni presjek, S_0 / mm^2	Mjerna duljina L_0 / mm
Normalna	$d_0 = 20$	314	200
Proporcionalno duga	d_0	S_0	$10d_0$
Proporcionalno kratka	d_0	S_0	$5d_0$
Plosnato proporcionalno duga	a_0, b_0	S_0	$11,3 \sqrt{S_0}$
Plosnato proporcionalno kratka	a_0, b_0	S_0	$5,65 \sqrt{S_0}$

- Statički vlačni pokus provodi se na ispitnim uzorcima iz materijala: meki čelik, tvrdi čelik, sivi lijev, mjed i aluminij.

- **Tehnički ispitni uzorci**

To su neobrađeni ispitni uzorci, koje se posebno ne izrađuju obradbom materijala, već se uzimaju i ispituju u stanju svog gotovog proizvoda. Najčešće se koriste za razna ispitivanja: žice, čelične užadi, cijevi, profila, lima, lanaca, betonskog čelika, gotovih strojnih elemenata i slično. Svi ti ispitni uzorci ispituju se u određenim i slobodnim mjernim duljinama.

4.1.1.1.2. Tjek ispitivanja

- Ispitivanje se provodi na uređajima koji se nazivaju kidalice, na kojima se ispitni uzorci kontinuirano vlačno opterećuju do loma.
- Pri ispitivanju kontinuirano se mjere sila i produljenje ispitnog uzorka. Pisačem se grafički registrira dijagram "sila – produljenje", koji se naziva dijagram kidanja.
- Opterećenje se kod kidalice ostvaruje hidraulički ili mehanički.



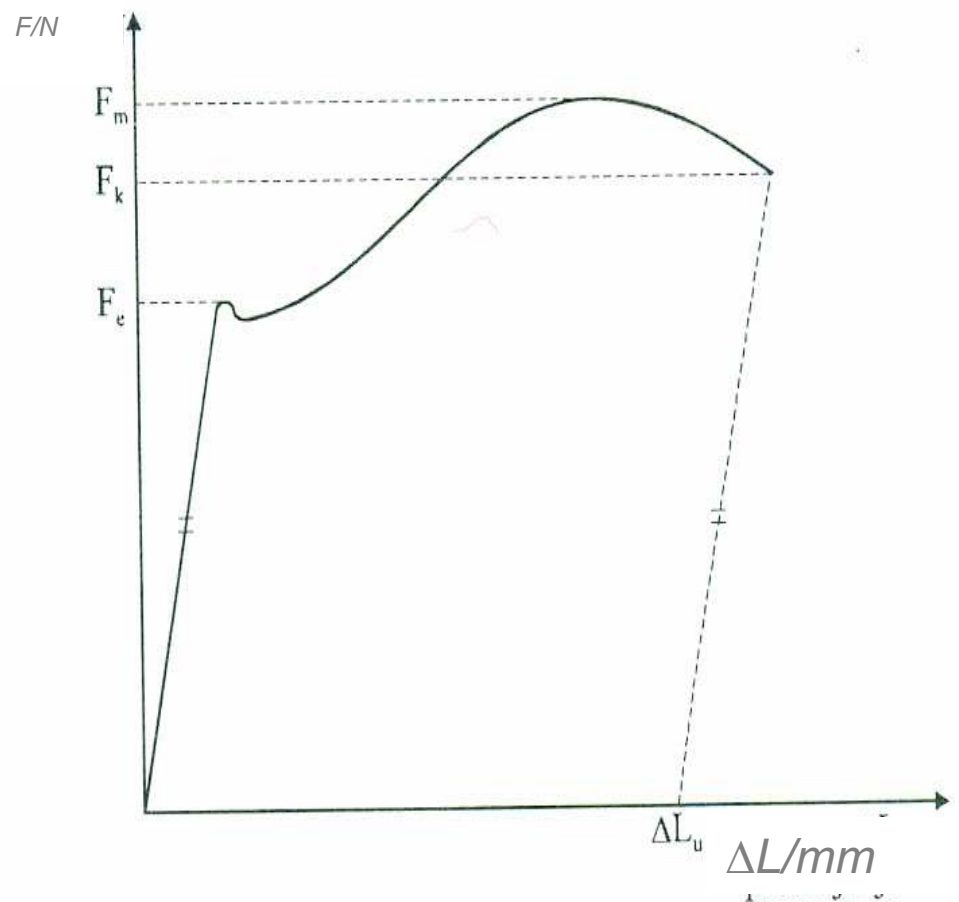
Slika 4.15: Kidalica

Tijekom statičkog
vlačnog pokusa na
kidalici, očitavaju se
vrijednosti
karakterističnih sila:

F_e - sila na granici
razvlačenja;

F_m - maksimalna sila;

F_k - konačna sila.



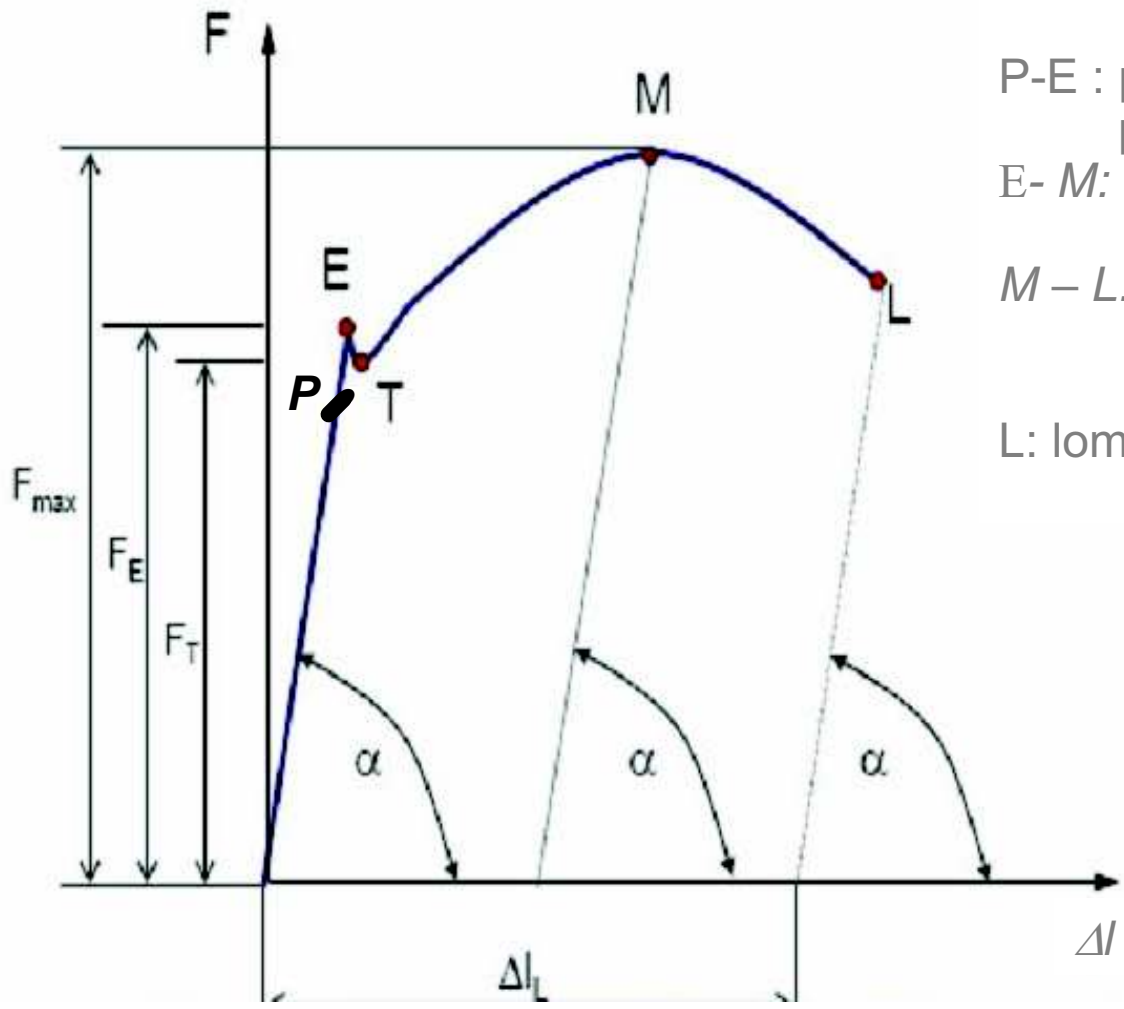
F_e – sila na granici razvlačenja

F_m -maksimalna sila

F_k - konačna sila

Slika 4.16: Dijagram sila F – produljenje Δl za niskouglični (meki) čelik

- Nakon dostizanja sile na granici razvlačenja ispitni uzorak se nastavlja produljivati uz čak mali pad sile. Za daljnje rastezanje materijala potrebno je daljnje povećanje sile.
- Opterećenje se povećava sve do maksimalne sile F_m , nakon koje se ispitni uzorak nastavlja produljivati uz sve manju silu.
- Sila koja je potrebna za deformiranje ispitnog uzorka smanjuje se zbog lokaliziranog smanjenja ploštine poprečnog presjeka.
- Pri vrijednosti sile F_k , konačne sile, nastupa lom ispitnog uzorka.



- O – P: područje elastičnih deformacija
- P-E : područje elastične i plastične deformacije
- E- M: područje trajnih (plastičnih) deformacija
- M – L: područje deformacija s nastankom mikropukotina u materijala
- L: lom ispitnog uzorka

Slika 4.17: Karakteristične točke na dijagram sila F – produljenje Δl

- **Područje OP**

- je područje elastičnih deformacija.
- ovdje vrijedi HOOKEOV zakon
- područje dijagrama koristi se za strojarske konstrukcije

- **Područje EM**

- je područje trajnih deformacija.
- to je područje razvlačenja, popuštanja – tečenja i očvršćivanja materijala,
- značajno je kod plastične obradbe materijala.

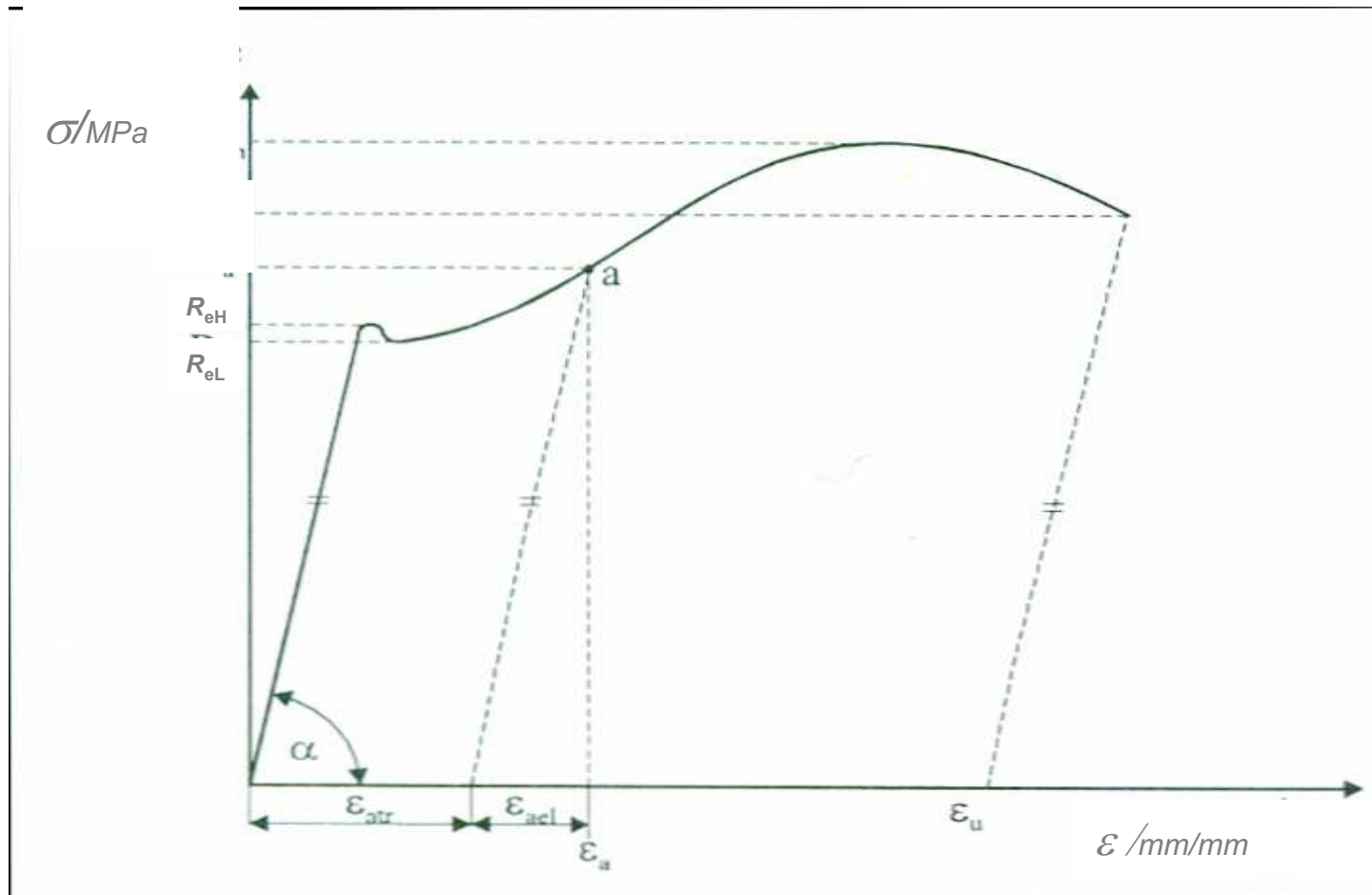
- **Područje ML**

- je područje deformacija s nastankom vrata na ispitnom uzorku i mikropukotina u materijala, uz istovremeno opadanje sile kod konvencionalnog dijagrama.
- značajno je kod obradbe materijala rezanjem i odvajanjem čestica.

- Iznosi sila pri statičkom vlačnom pokusu ne daju pravi uvid u mehaničku otpornost materijala ukoliko se ne uzme u obzir ploština poprečnog presjeka ispitnog uzorka odnosno ukoliko se umjesto sile F ne uvede naprezanje σ , koje se određuje izrazom:

$$\sigma = \frac{F}{S_0} / MPa$$

- gdje je F sila izražena u N, a S_0 ploština početnog poprečnog presjeka ispitnog uzorka u mm².

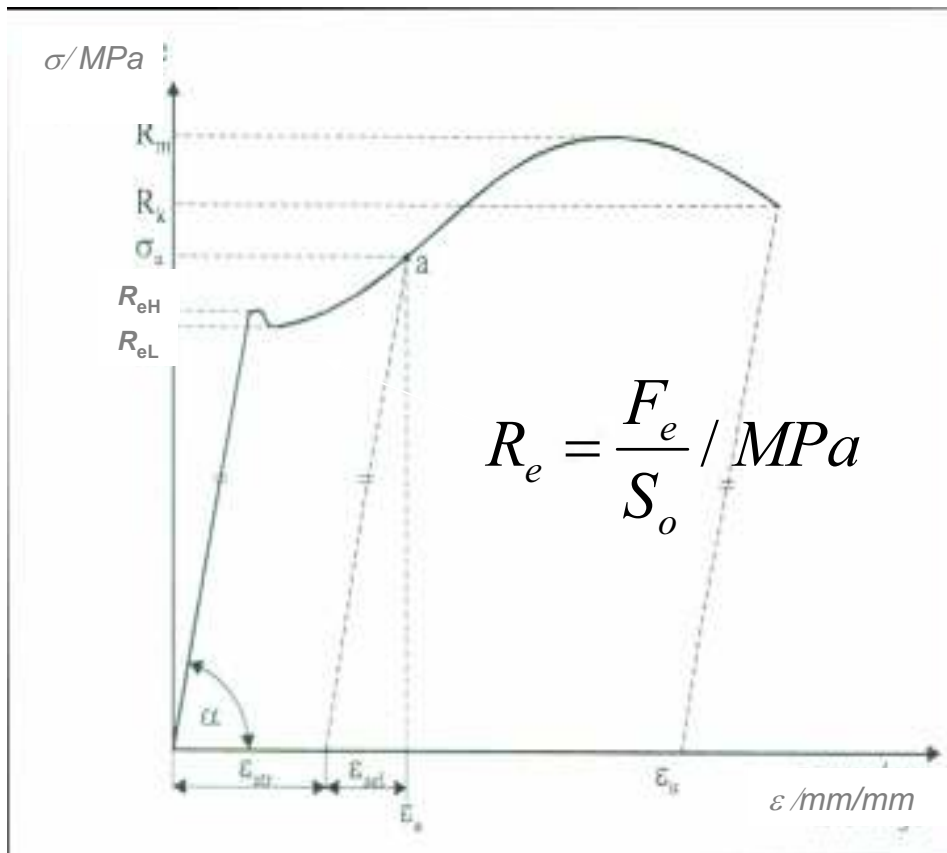


Slika 4.18: Dijagram naprezanje σ – istežanje ε za niskouglični (meki) čelik

- R_e – granica razvlačenja
- R_{eH} – gornja granica razvlačenja
- R_{eL} – donja granica razvlačenja
- R_m – vlačna čvrstoća

4.1.1.1.3. R_e – granica razvlačenja

je ono najniže naprezanje pri vlačnom opterećenju koje izaziva znatno istezanje ispitnog uzorka bez povišenja sile



Slika 4.19: Granica razvlačenja

Određuje se iz dijagrama sila – produljenje

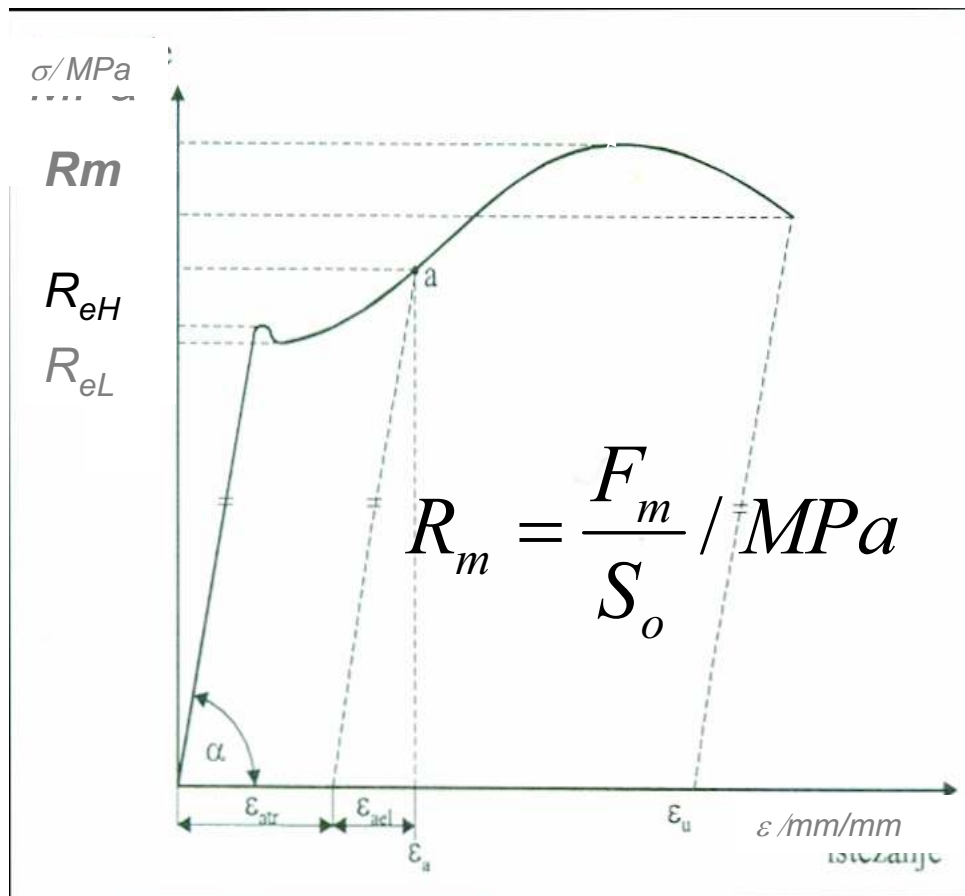
Karakteriziraju je dvije vrijednosti

R_{eh} – gornja granica razvlačenja

R_{el} - donja granica razvlačenja

4.1.1.1.4. Vlačna čvrstoća

je osnovno mehaničko svojstvo uz granicu razvlačenja na temelju kojeg se materijali vrednuju prema njihovoj mehaničkoj otpornosti.

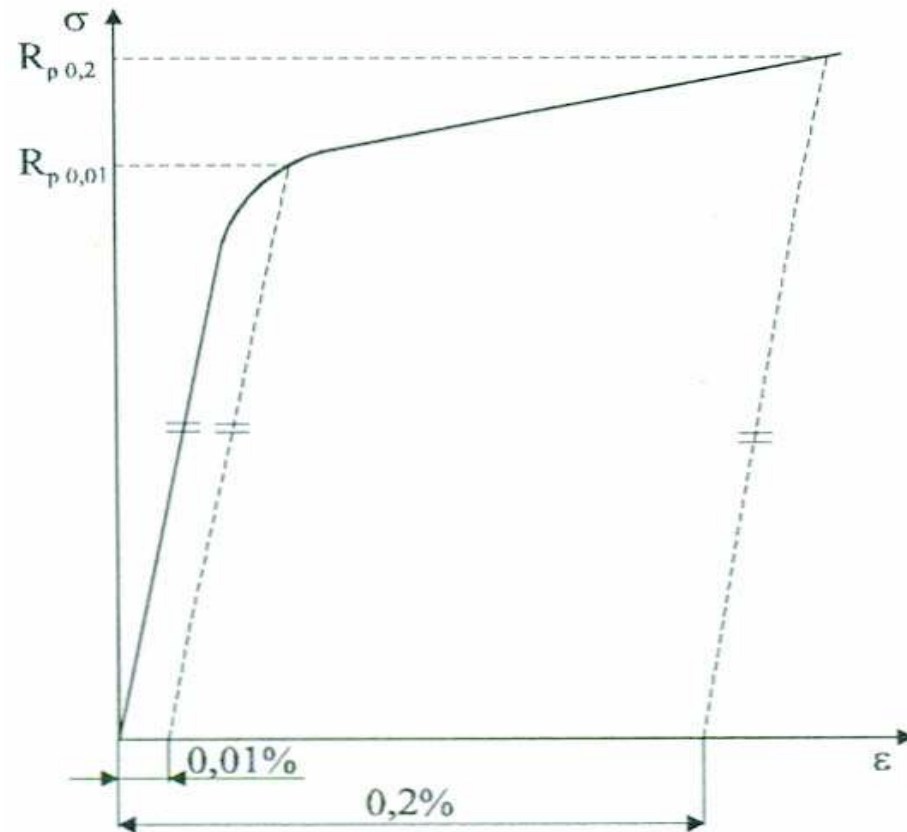


Predstavlja omjer
maksimalne sile
postignute pri statičkom
vlačnom pokusu i
ploštine
početnog presjeka
ispitnog uzorka

Slika 4.20: Vlačna čvrstoća

4.1.1.1.5. Konvencionalna granica razvlačenja, R_p

- Kod ostalih materijala koji imaju kontinuiran prijelaz iz područja elastičnih u područje plastičnih deformacija utvrđuje se konvencionalna granica razvlačenja tj. ono naprezanje koje će nakon rasterećenja ostaviti u materijalu određenu plastičnu deformaciju (obično 0,2%).



■ $R_{p0,01}$ - Ostaje u materijalu
plastična deformacija 0,01%
(tehnička granica elastičnosti)

$R_{p0,2}$ - Ostaje u materijalu
plastična deformacija 0,2%

Slika 4.21: Konvencionalna granica razvlačenja za
plastične deformacije 0,01 i 0,2%

4.1.1.1.6. Istezljivost

- Statičkim vlačnim pokusom utvrđuje se i konačno relativno produljenje ili konačno istežanje A .
- Konačno istežanje A definirano je izrazom:

$$A = \frac{L_k - L_0}{L_0} \cdot 100 / \%$$

- pri čemu je L_k , mm, produljenje nakon kidanja, a L_0 , mm, početna mjerna duljina ispitnog uzorka.

- $A_{11,3}$ pokazuje da je istezljivost utvrđena na dugačkom plosnatom ispitnom uzorku.
- Na osnovi iznosa istezljivosti A , materijali se međusobno uspoređuju u pogledu deformabilnosti.
- No iznos istezljivosti daje samo informaciju o deformabilnosti materijala u uzdužnom smjeru ispitnog uzorka.

4.1.1.1.7. Kontrakcija

- Relativno smanjenje površine poprečnog presjeka ispitnog uzorka u odnosu na početnu površinu naziva se kontrakcija ili suženje
- Kontrakcija Z je definirana izrazom:

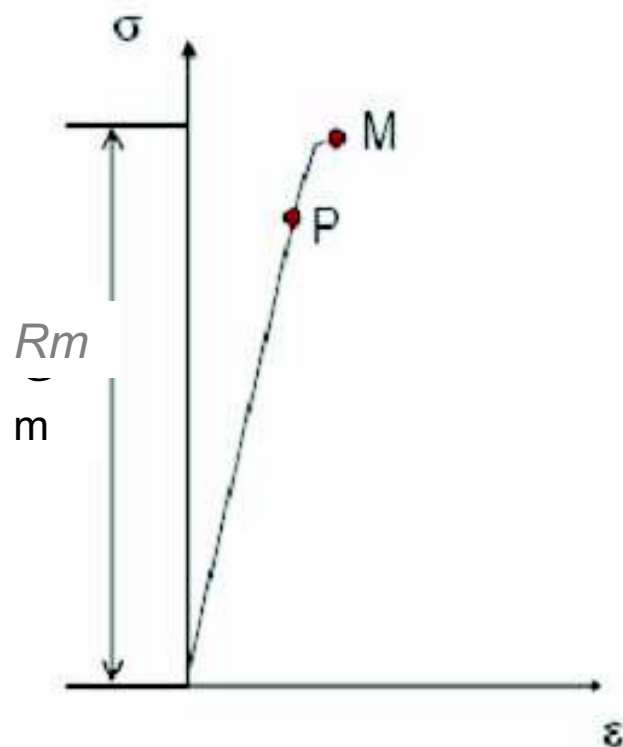
$$Z = \frac{S_0 - S_k}{S_0} \cdot 100 / \%$$

- pri čemu je S_k , ploština presjeka ispitnog uzorka na mjestu loma
 S_0 , početna ploština presjeka ispitnog uzorka .

Kako se ispitni uzorak prilikom statičkog vlačnog pokusa istovremeno produljuje i sužava, veličina koja karakterizira deformabilnost materijala u smjeru poprečnom na djelovanje opterećenja naziva se kontrakcijom Z .

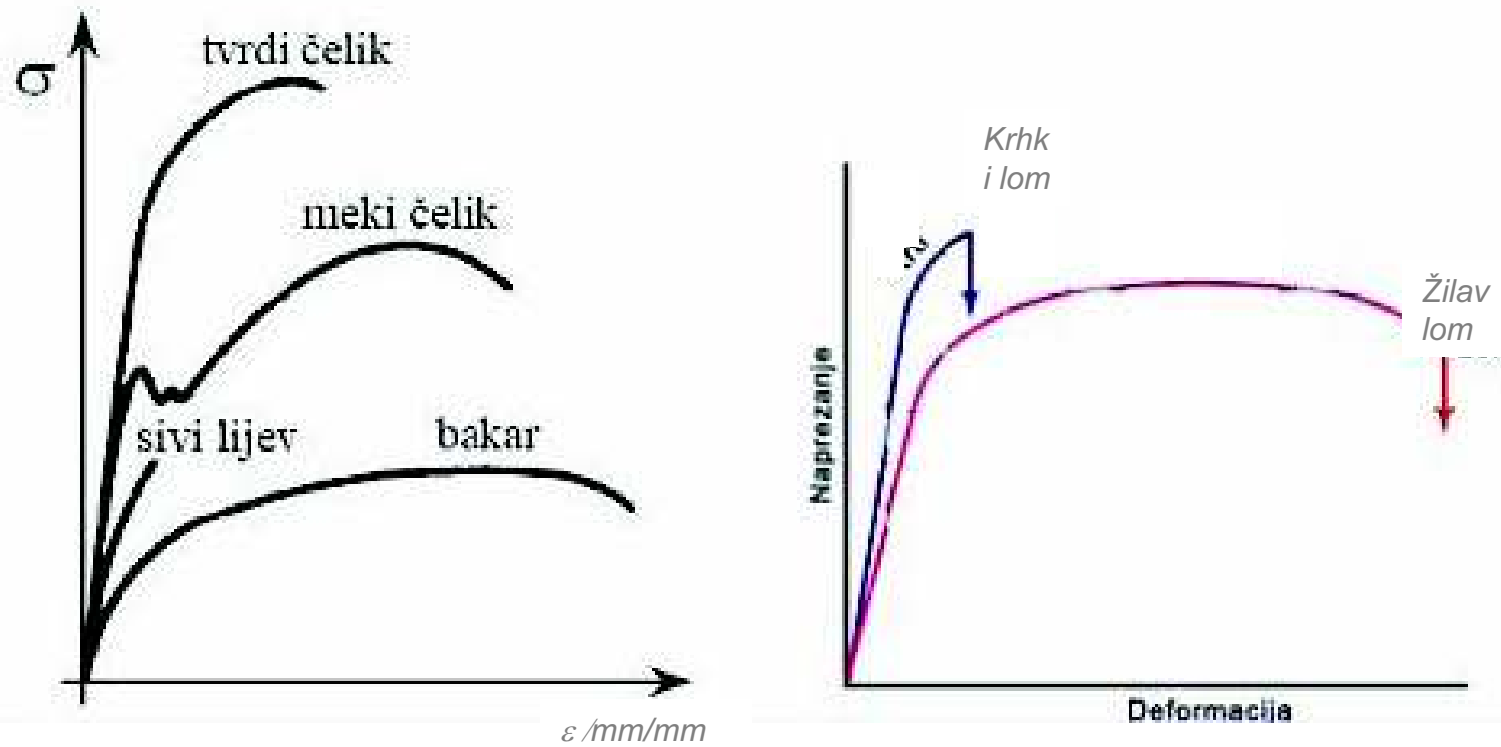
Istezljivost A i kontrakcija Z mehanička su svojstva koja se prvenstveno koriste za ispitivanje materijala pri obradbi deformiranjem.

Različiti materijali različito se ponašaju pri djelovanju opterećenja



- Nema platoa tečenja
- P granica proporcionalnosti
- M predstavlja vlačnu čvrstoću

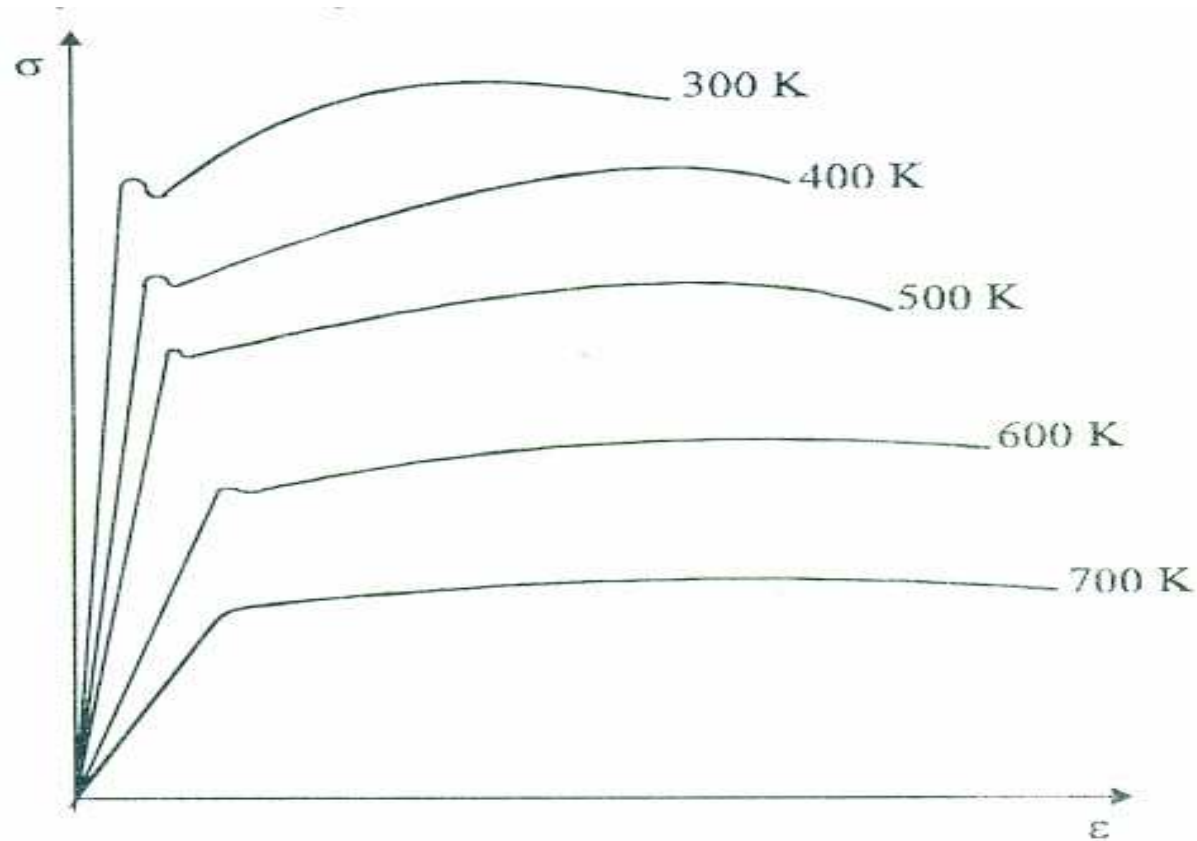
Slika 4.22: Dijagram naprežanje σ – istežanje ε za krhke materijale



Slika 4.23: Dijagram naprezanje σ – istezanje ϵ za različite materijale

4.1.1.1.8. Statički vlačni pokus na povišenim temperaturama

- Da bi se utvrdilo ponašanje materijala na povišenim temperaturama provodi se statički vlačni pokus na ispitnim uzorcima koji se tijekom ispitivanja zagrijavaju na zadanu temperaturu
- Povišenjem temperature:
 - R_e i R_m se smanjuju
 - R_e je slabije izraženo
 - A se povećava
 - E se smanjuje



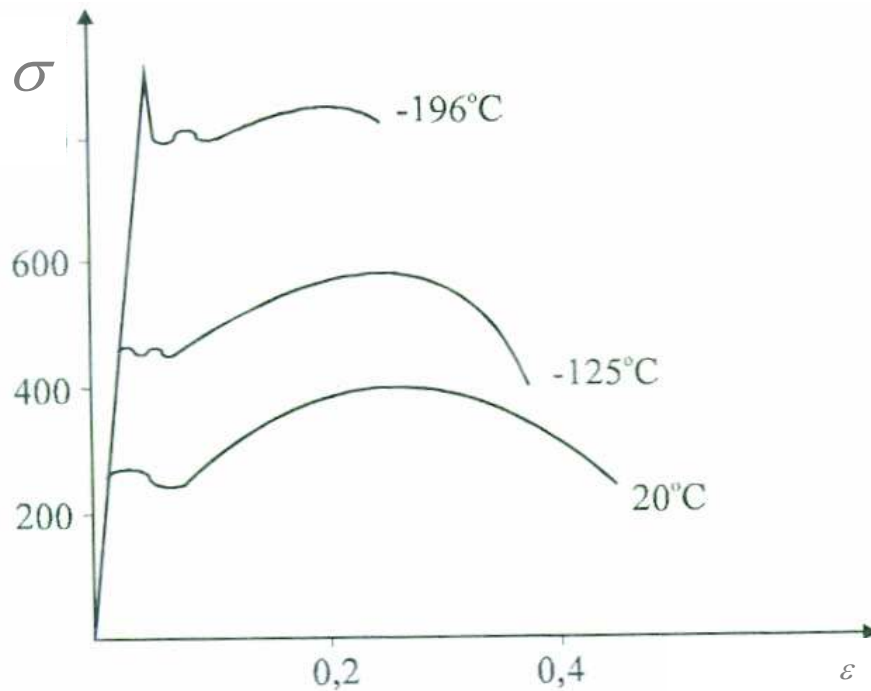
Slika 4.24: Utjecaj povišene temperature na rezultate statičkog vlačnog pokusa

To je kratkotrajno ispitivanje i ne daje pravi uvid u ponašanje materijala kod povišenih temperatura

Puzanje - dugotrajno statičko naprezanje

4.1.1.1.9. Statički vlačni pokus pri sniženim temperaturama

- Utjecaj snižene temperature na rezultate statičkog vlačnog pokusa dan je na slici 4.25



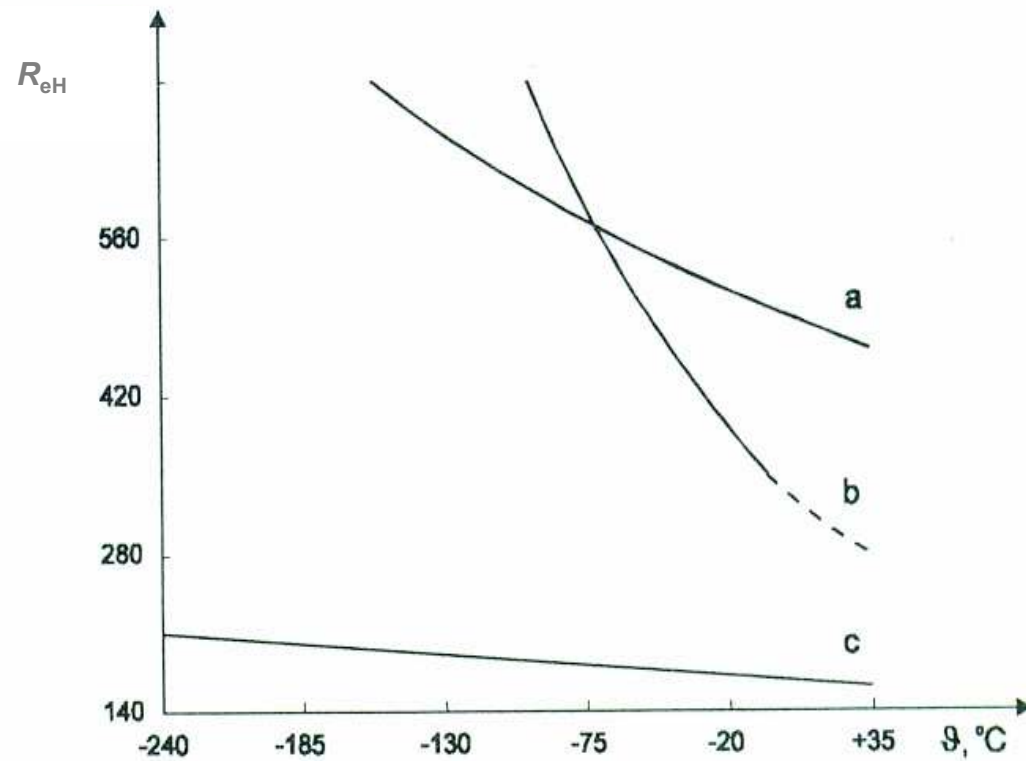
Snižavanjem temperature:

R_e i R_m rastu

R_e postaje jače izražena

A se smanjuje

Slika 4.25: Utjecaj snižene temperature na rezultate statičkog vlačnog pokusa

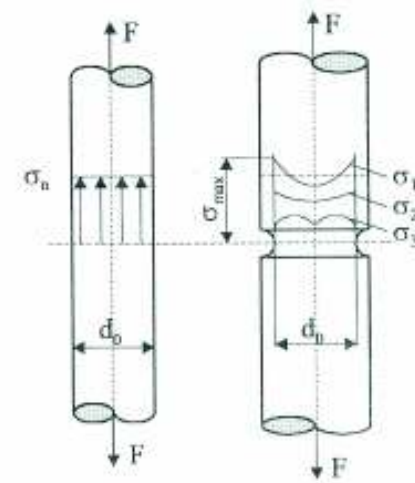


a – legirani čelik
b – ugljični čelik
c – čisti nikal

Slika 4.26: Utjecaj snižene temperature na granicu razvlačenja

Utjecaj utora

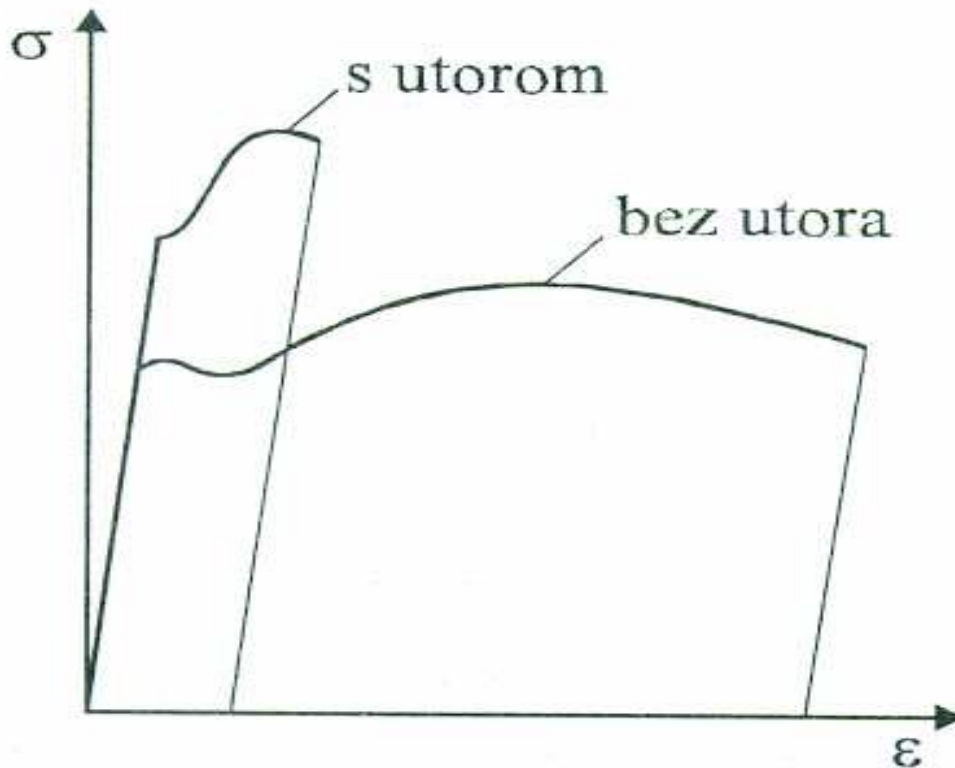
- Ukoliko se pokus provodi na ispitnim uzorcima koji imaju utor na radnom dijelu ili neko drugo oštećenje mijenja se intenzitet naprezanja, a time i rezultati pokusa



Slika 4.27: Raspodjela naprezanja u ispitnom uzorku s utorom

U smjeru opterećenja u zarezu nastaju longitudinalna naprezanja σ_1 , okomito na njih cirkularno naprezanje σ_2 a u smjeru okomito na σ_1 i σ_2 radijalno naprezanje σ_3 .
Najveće longitudinalno naprezanje $\sigma_1 = \sigma_{\max}$

- Utjecaj utora na dijagram naprezanje-istezanje



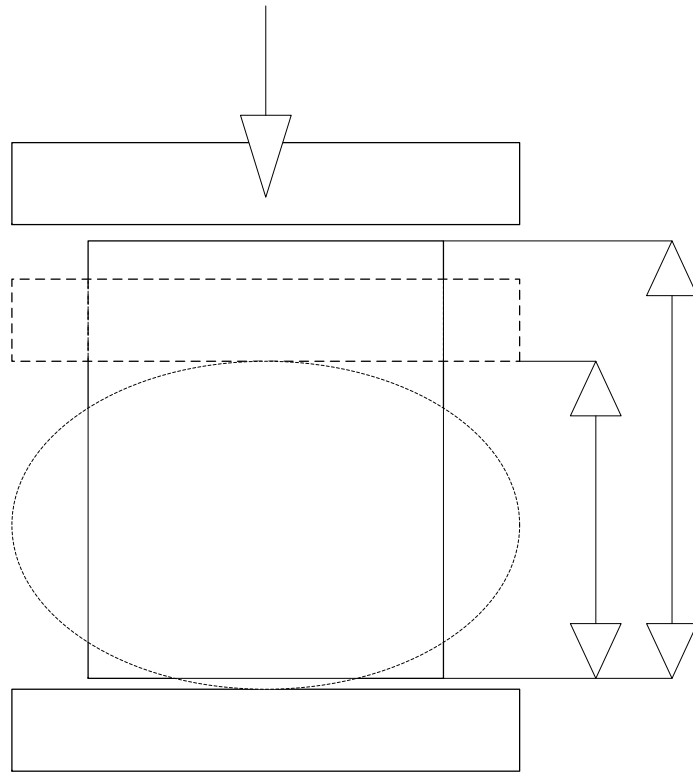
Kod ispitnih
uzoraka s utorom:
 R_e i R_m rastu
 A se smanjuje

Slika 4.28: Dijagram naprezanje σ – istežanje ϵ za ispitne uzorke s utorom

4.1.1.2. Statički tlačni pokus

- Utvrđuju se mehanička svojstva pri tlačnom naprezanju
- Ovom vrstom ispitivanja kod tvrdih i krhkih materijala određuje se njihova čvrstoća na tlak i sposobnost deformiranja.
- Od strojarskih materijala najčešće se ispituje:
 - lijevano željezo,
 - kaljeni čelik,
 - materijal kliznih ležaja,
 - mjedene i brončane legure,
 - plastika i guma.

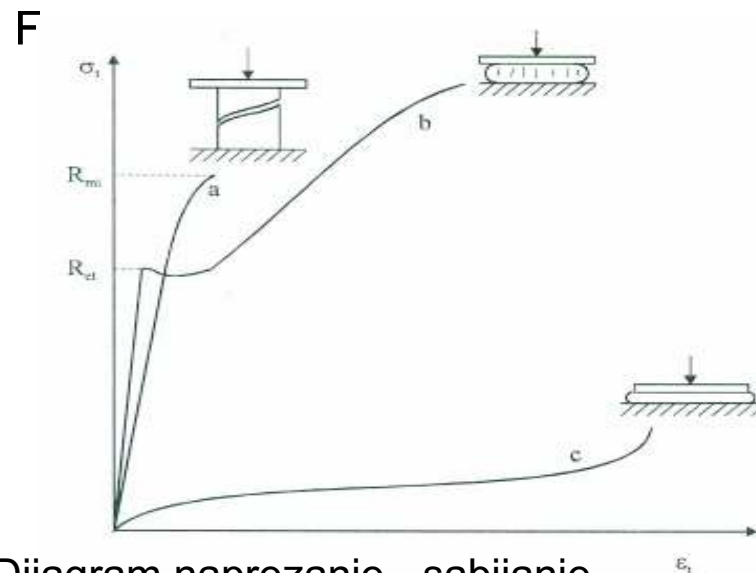
Ispitivanje se provodi na kidalicama ili prešama



$$R_{et} = \frac{F_{et}}{S_0} / MPa$$

Ispitni uzorci su najčešće valjkastog ili kockastog oblika,

- promjera $d_0 = 10-30$ mm i
- visine $L_0 = (1-3)d_0$.



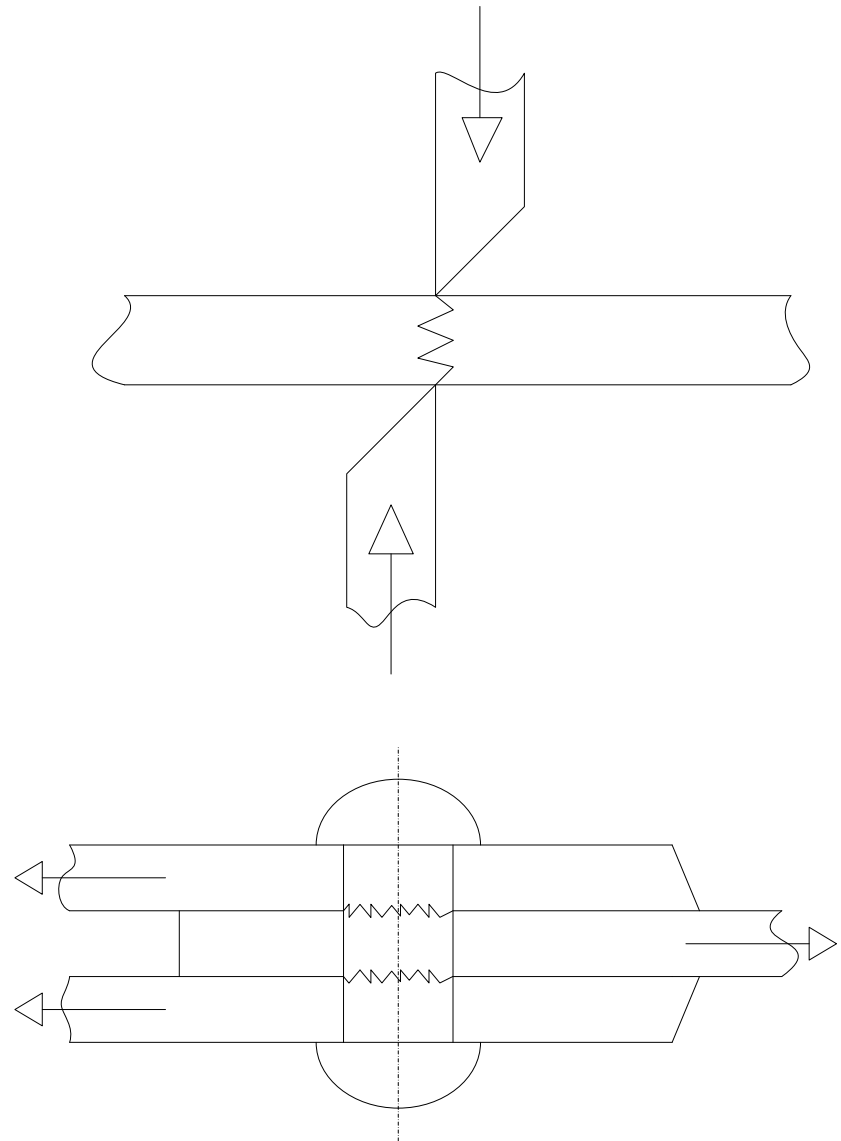
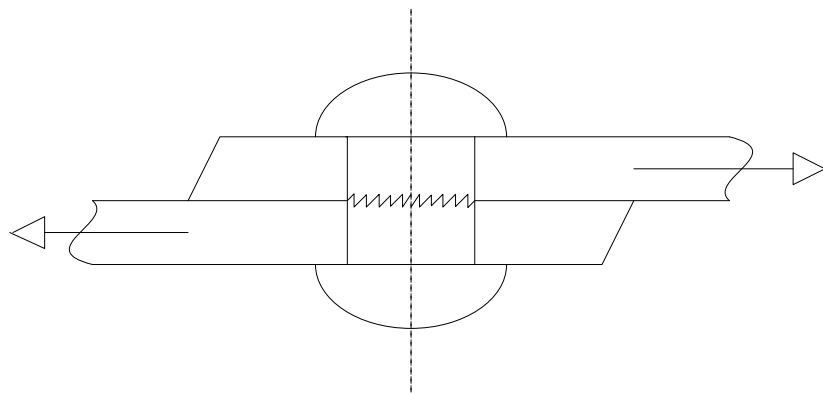
Slika 4.29: Dijagram naprezanje - sabijanje

- **Postupak ispitivanja**
- Sastoji se u pravilnoj pripremi, postavljanju, deformiranju i lomljenju ispitnih uzoraka.
- Pripremljeni ispitni uzorak se postavlja na kidalicu pravilno među tlačne ploče i postepeno se hidrauličnom silom deformira do trenutka pojave pukotine, lomljenja, postizanja određenog opterećenja ili određenog skraćanja.
- Pri tome se dobiva tlačni dijagram, izgleda suprotno vlačnom i u III. kvadrantu, a ispitni uzorak se skraćuje i bačvasto proširuje.

4.1.1.3. Smična ispitivanja

Zadatak ispitivanja

- odrediti čvrstoću materijala na smik kod raznih strojnih elemenata, opterećenih okomito na njihovu uzdužnu os.



Slika 4.30: Smična ispitivanja

- Spojeni elementi izloženi smičnom djelovanju opterećenja su:
 - razne zakovice,
 - vijci i profili,
 - limovi i profili (kod rezanja)
 - zavari (na karakterističnim metalnim konstrukcijama).

- **Postupak ispitivanja**

- Ispitni uzorak, promjera 5-20 mm i duljine prema potrebi, učvršćuje se u ispitnu napravu na univerzalnoj kidalici.
- Potom se učvršćeni ispitni uzorak opterećuje na smicanje, postupnim hidrauličkim djelovanjem do trenutka njena prekida.
- Pri tome se prati i mjeri maksimalno opterećenje i izračunava smična čvrstoća:

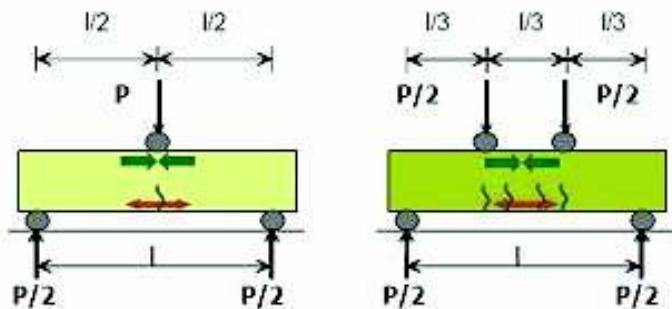
$$R_{mo} = \frac{F_{mo}}{25_0} / MPa$$

U samom procesu praktičnog ispitivanja ispitnog uzorka na smik, prvo se pojavljuju naprezanja i deformacije na tlak, gnječenje i savijanje, a zatim nastaje smicanje i lom-rez ispitnog uzorka.

4.1.1.4. Ispitivanja savijanjem

Zadatak ispitivanja

- omogućiti ispitivanje i određivanje čvrstoće na savijanje i veličine progiba, kod tvrdih i krhkih materijala, opterećenih okomitom silom na njihovim uzdužnim osima.
- ti materijali su: tvrdi čelik, lijevano željezo, neke vrste zavara te određeni nosači i konstrukcije u strojarstvu i građevinarstvu.
- Ispituje se na uzorcima oblika prizme (grede) opterećenih a jednom ili dvije koncentrirane sile.



Slika 4.31: Ispitivanja savijanjem



- **Postupak ispitivanja**

- Sastoji se u pravilnoj izvedbi ispitnih uzoraka i njihovom pravilnom postavljanju na okretljive oslonce uređaja savijanja na kidalici.
- Zatim se ispitni uzorak postupno hidrauličkom silom savija do pojave njenog napuknuća ili prijeloma, postizanja određenog opterećenja ili određenog progiba. Potom se izračunava čvrstoća na savijanje po određenoj formuli, a veličina progiba mjeri se specijalnim komparatorom ili se izračunava po određenoj formuli.

4.1.1.5. Ispitivanja uvijanjem

- **Zadatak ispitivanja**

omogućiti određivanje čvrstoće materijala na uvijanje ili torziju, te otpora materijala elastičnim deformacijama uvijanja

- **Koristi se**

kod raznih vratila, osovina i drugih strojnih elemenata izloženih torzijskim opterećenjima.

- **Provodi se**

na odgovarajućim ispitnim uzorcima i horizontalnim ili vertikalnim strojevima za uvijanje.

Postupak ispitivanja:

- pripremljeni ispitni uzorak, kružnog, cjevastog, kvadratnog ili višekutnog poprečnog presjeka, učvršćuje se jednim krajem u nepomičnu, a drugim krajem u pokretnu čeljust stroja za uvijanje.
- potom se pomična čeljust optereti momentom uvijanja M_u , a određuje se kut uvijanja γ .

- Ovdje se naprezanja pojavljuju u slojevitim poprečnim i uzdužnim presjecima cijele mjerne duljine ispitnog uzorka L_0 , od maksimalnih na površini ispitnog uzorka, do minimalnih i neutralnih u sredini ispitnog uzorka.
- Ispitni uzorak se opterećuju uvijanjem, do pojave pukotine, a dijagram uvijanja sličan je vlačnom dijagramu (tangencijalno naprezanje).

NORME

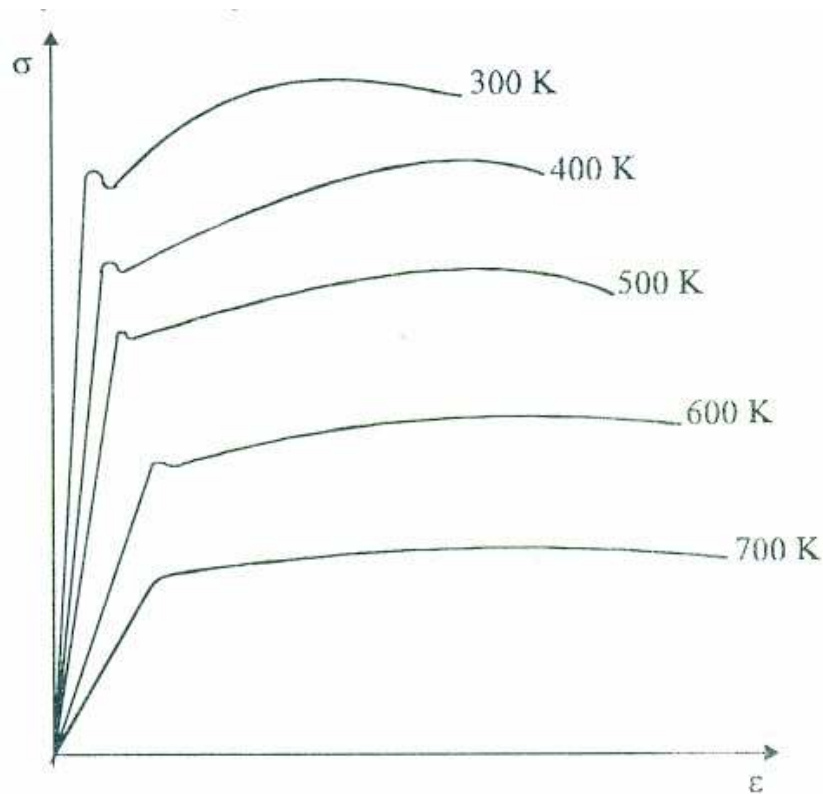
- HRN DIN EN 10002-1, Statički vlačni pokus
- EN ISO 377, Čelik i čelični proizvodi – Izrada uzoraka za mehanička ispitivanja
- DIN EN 1002-1:2001, ISO 6892:1998, Vlačni pokus pri sobnoj temperaturi
- ISO 783:1999, Vlačni pokus pri povišenim temperaturama
- ISO 15579:2000, DIN EN 10002-5, Vlačni pokus pri sniženim temperaturama
- DIN 50109, Ispitivanje sivog ljeva razvlačenjem

4.1.2. DUGOTRAJNA STATIČKA ISPITIVANJA

- **4.1.2.1. PUZANJE**

4.1.2.1. Puzanje materijala

je pojava u materijalu pri dugotrajnom opterećenju na povišenim temperaturama

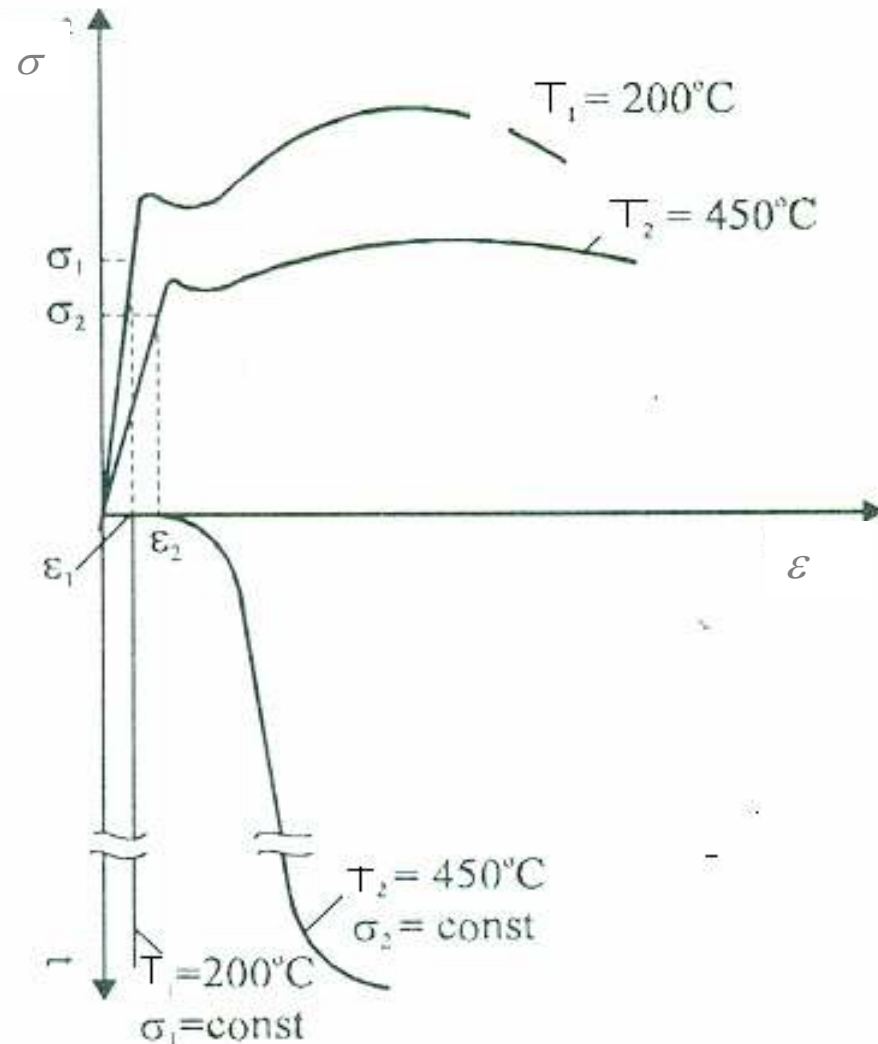


Slika 4.32: Utjecaj povišene temperature na rezultate statičkog vlačnog pokusa

- uzorci se postepeno zagrijavaju na temperaturu ispitivanja.
- temperatura se održava konstantnom tijekom ispitivanja.
- uzorci se podvrgavaju konstantnim vlačnim naprežanjem
- ispitivanje traje od 45 sati do nekoliko godina (100000sati).

Pojašnjenje na primjeru dva ispitna uzorka iz istog materijala na višim temperaturama

- kratkotrajno ispitivanje
- dugotrajno ispitivanje pri opterećenju manjem od R_e

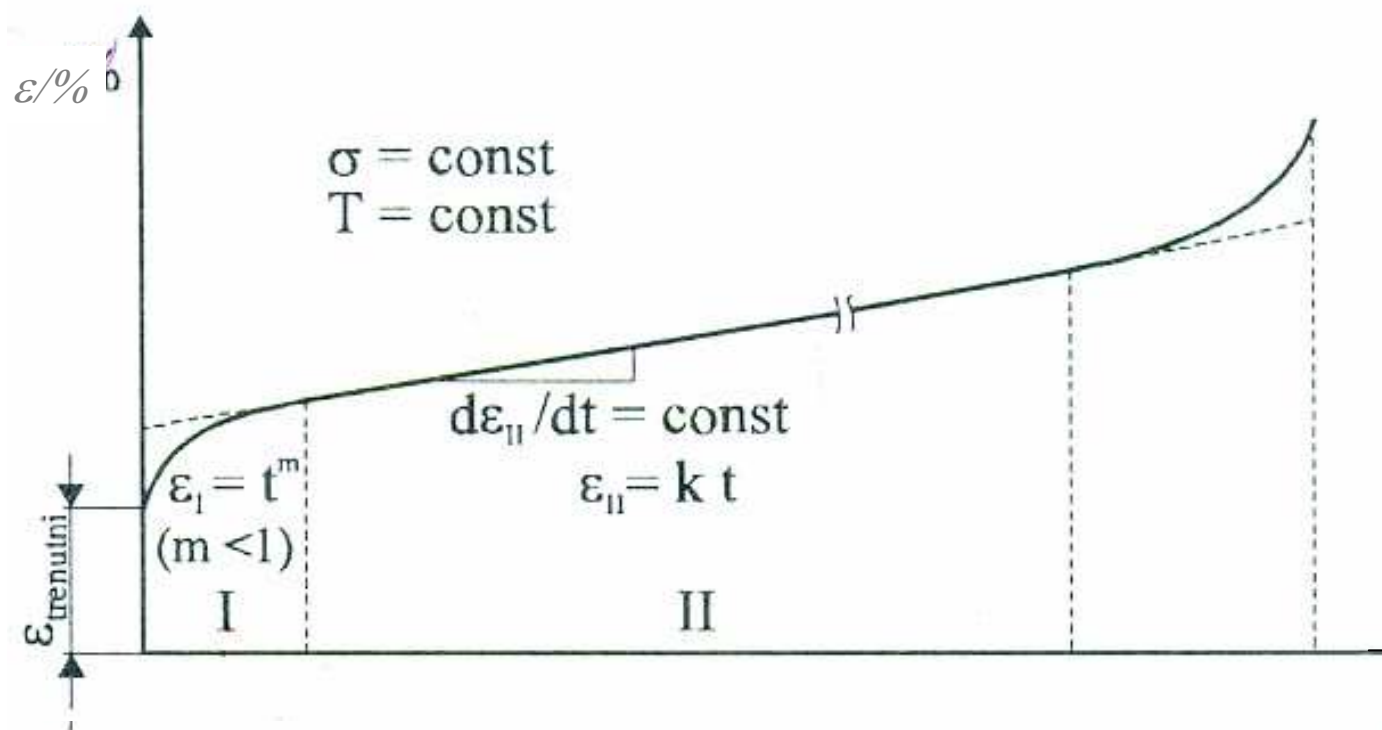


Slika 4.33: Dijagram puzanja kod različitih temperatura

Pri T_1 $\sigma_1 \Rightarrow \epsilon_1 \rightarrow$ ako σ_1 raste, ϵ_1 ostaje konstantan

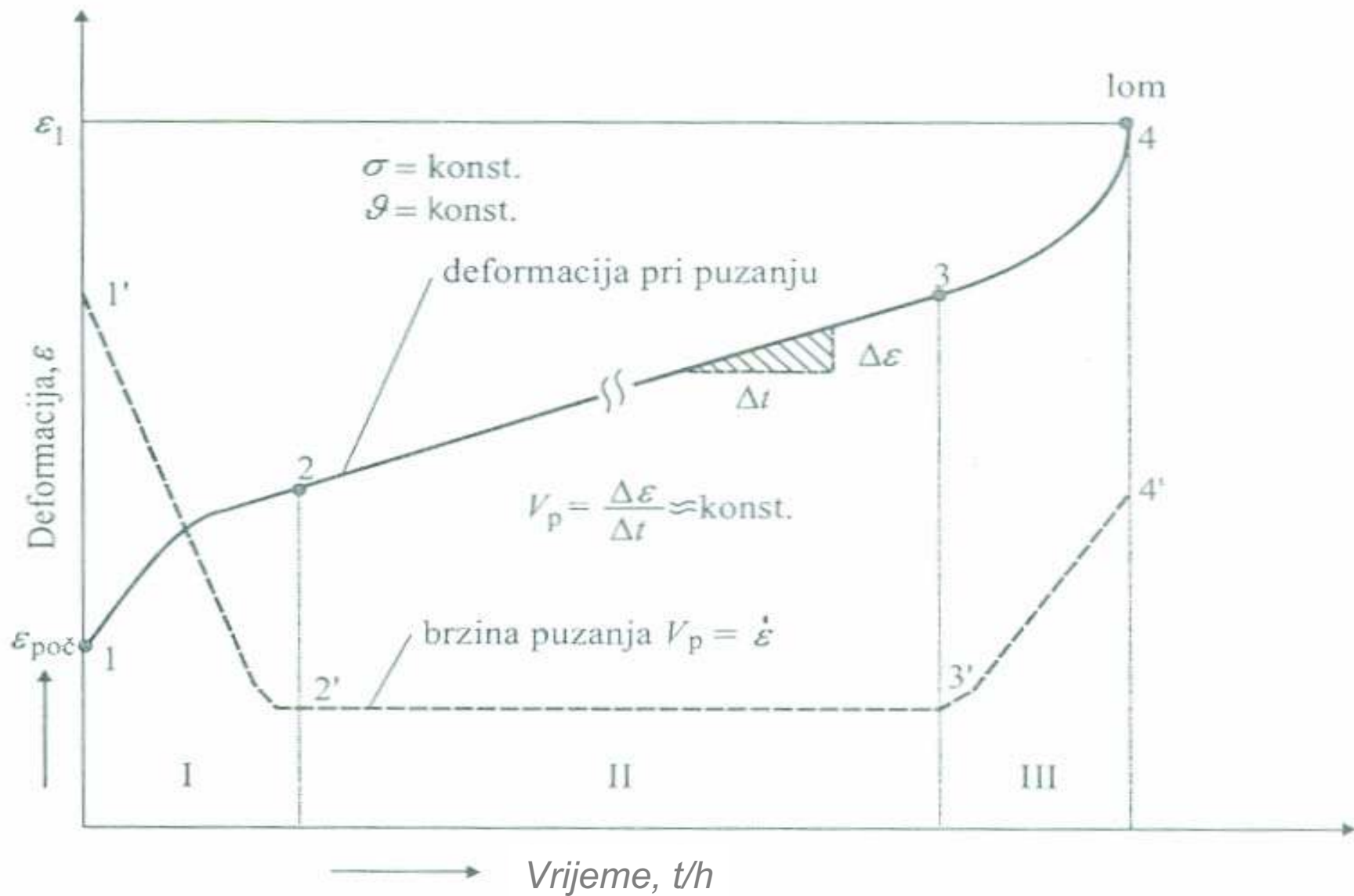
Pri T_2 $\sigma_2 \Rightarrow \epsilon_2 \rightarrow$ ako σ_2 raste, ϵ_2 raste

- Dijagram puzanja



Slika 4.34: Dijagram puzanja

- I. - početni stadij (spontana deformacija) $\varepsilon_I = t^m$ $m < 1$
- II. - stadij konstantne brzine (očvršćenje=omekšanje) $\varepsilon_{II} = k t$
- III. - stadij loma ispitnog uzorka (očvršćenje) $\varepsilon_{III} = t^m$ $m > 1$



Slika 4.35: Dijagram puzanja deformacija - vrijeme

- Puzanje materijala je toplinski aktivirani, ireverzibilni proces deformacije materijala koji nastaje u uvjetima konstantnog opterećenja tijekom duljeg vremena na povišenoj temperaturi
- Na pojavu puzanja utječe:
 - temperatura tališta materijala
 - tip kristalne rešetke i atomske veze
 - mikrostrukturno stanje materijala

Kako utječe temperatura?

$v_{\text{tališta}}$ – gornja granica korištenja materijala

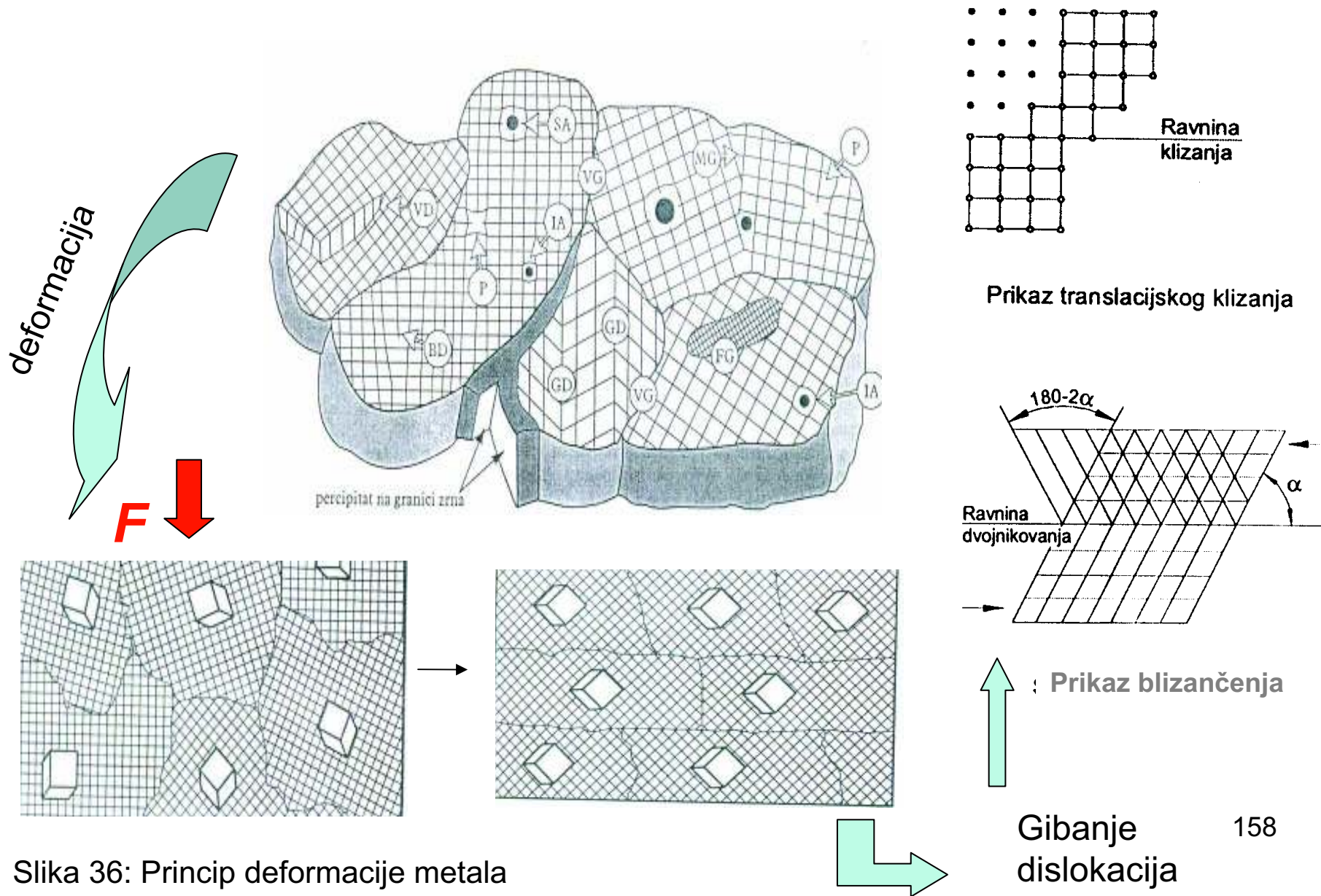
$$T_{\text{puzanja}} = 0,3T_{\text{tališta}}, \text{ K}$$

- čelik T_{puzanja} iznad 450°C
- legure bakra T_{puzanja} iznad 270°C
- olovo T_{puzanja} na sobnoj temperaturi

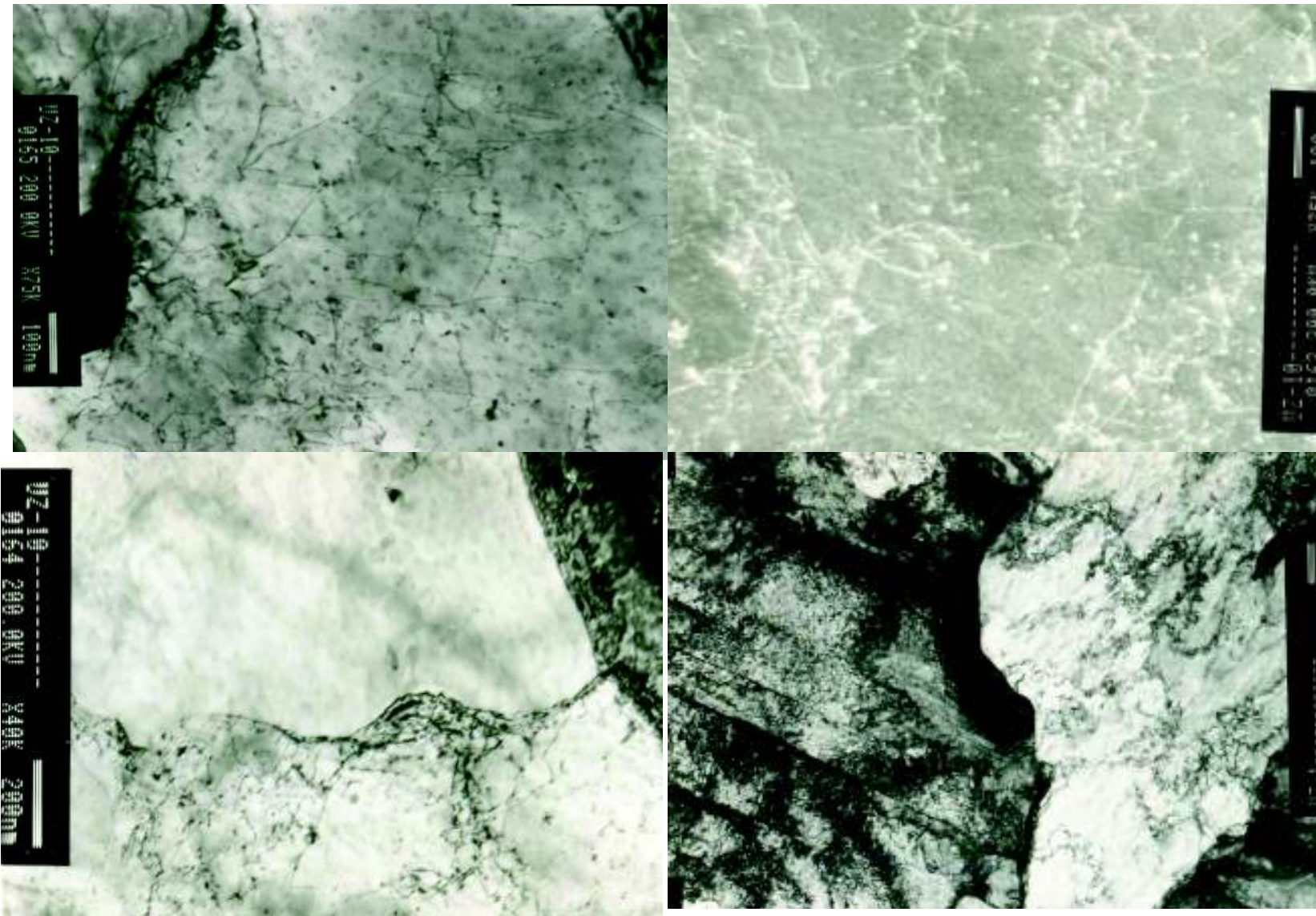
- Što je temperatura viša, kretanje dislokacija je brže

- Moguća je
 - preraspodjela dislokacija (oporavak)
 - poništavanje dislokacija (rekristalizacija)

- Kako dolazi do plastične deformacije metala?



Slika 36: Princip deformacije metala

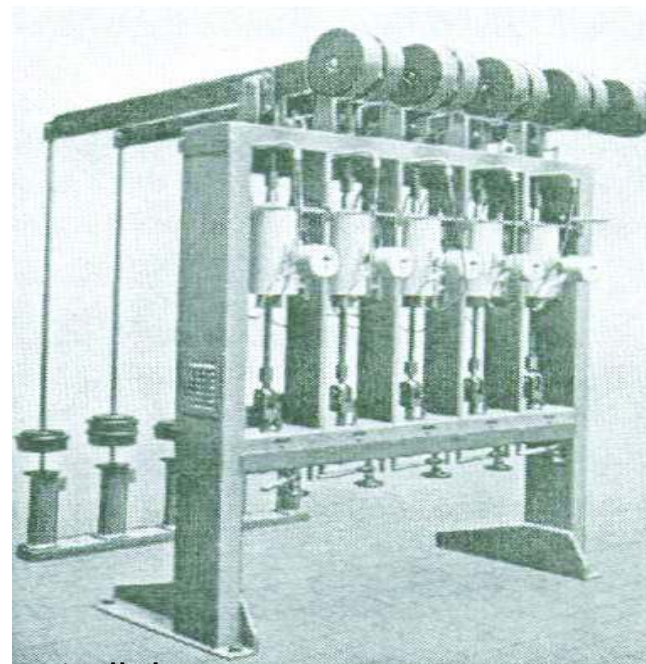
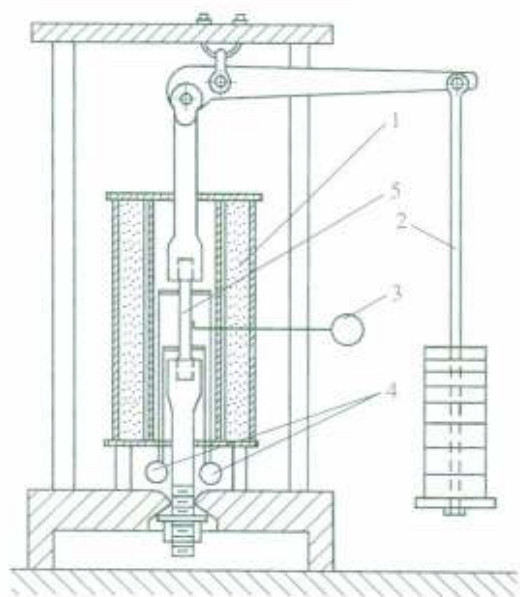
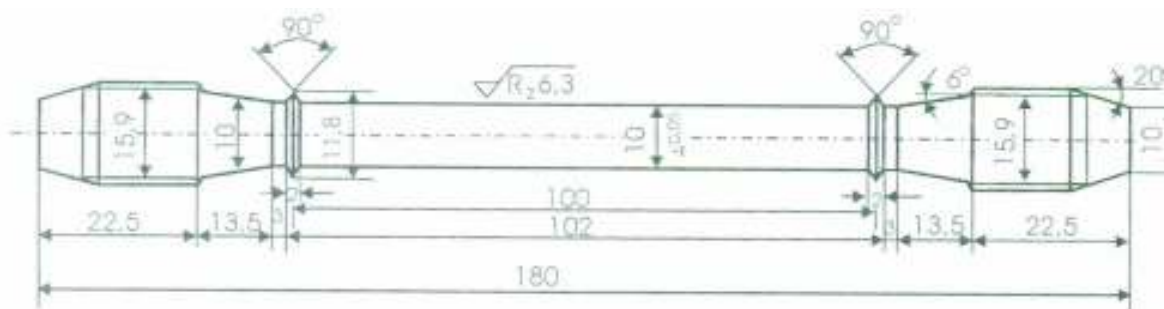


Slika 4.37: Dislokacije

- Što je više prepreka kretanju dislokacija, to je veća otpornost materijala na puzanje

- Ispitivanje se provodi na ispitnim uzorcima s navojem, na puzalicama

- Ispitni uzorak



Slika 4.38: Ispitivanje puzanjaem materijala

Registira se produljenje ispitnog uzorka s vremenom

Vrijeme ispitivanja

- kratkotrajno ako je $t \leq 100$ h
- dugotrajno ako je $t > 100$ h

- Granica puzanja $R_{pE/t/T}$ karakterizira otpornost materijala na puzanje



vlačno naprezanje pri temperaturi ispitivanja i trajanju ispitivanja koje uzrokuje deformaciju ε

Npr. $R_{p0,2/1000/500}$ je naprezanje gdje se kod 1000 sati ispitivanja na 500°C , ispitni uzorak trajno produlji za 0,2% .

- Statička izdržljivost $R_{m/t/T}$ je ono vlačno naprezanje pri temperaturi υ , koje u zadanom vremenu t dovodi do loma ispitnog uzorka
- $R_{m/10\ 000/475}$
- Istezanje pri puzanju $A_{10/t/v}$
- Kontrakcija pri puzanju $Z_{t10/t/v}$

- **Relaksacija** je pojava snižavanja naprezanja u napregnutom konstrukcijskom dijelu pri konstantnoj početnoj deformaciji
- Određuje se mjerenjem sniženja sile tijekom vremena ispitivanja
- Nastaje zato što se dio elastične deformacije pretvara u plastičnu uslijed puzanja i ono raste s porastom temperature
- Relaksacija se ispituje kod vijaka, čelične užadi, čelika za prednaprezanje

NORME

- DIN 50118-1982 - Ispitivanje statičke izdržljivosti vlačno opterećenih metalnih materijala
- DIN 51226 Uređaji za ispitivanje statičke izdržljivosti
- ISO204-1997

4.2.DINAMIČKA ISPITIVANJA

4.2.1. **Kratkotrajna Ispitivanja**

4.2.1.1. Određivanje udarnog rada loma

4.2.2. **Dugotrajn Ispitivanja**

4.2.2.1. Umor materijala

4.2.2.2. Dinamička izdržljivost

4.2.1.1. Određivanje udarnog rada loma

- Materijali podložni lomovima
- Svojstvo materijala
- Sklonost materijala prema lomu
- Uvjeti eksploatacije
- Nastajanje loma

4.2.1.1.1. Žilavost i udarni rad loma

- Udarni rad loma

Određuje otpornost materijala krhkom lomu i mjera je za žilavost materijala

ŽILAVOST - svojstvo materijala

Žilavost je sposobnost materijala da plastičnom deformacijom razgradi naprezanja i na taj način povisi otpornost materijala na krhki lom.

Udarni rad loma je energija utrošena za lom ispitnog uzorka kod ispitivanja.

- Označava se sa ***KU / KV*** i
- Izražava se u J.

4.2.1.1.2. Parametri koji utječu na žilavost čelika:

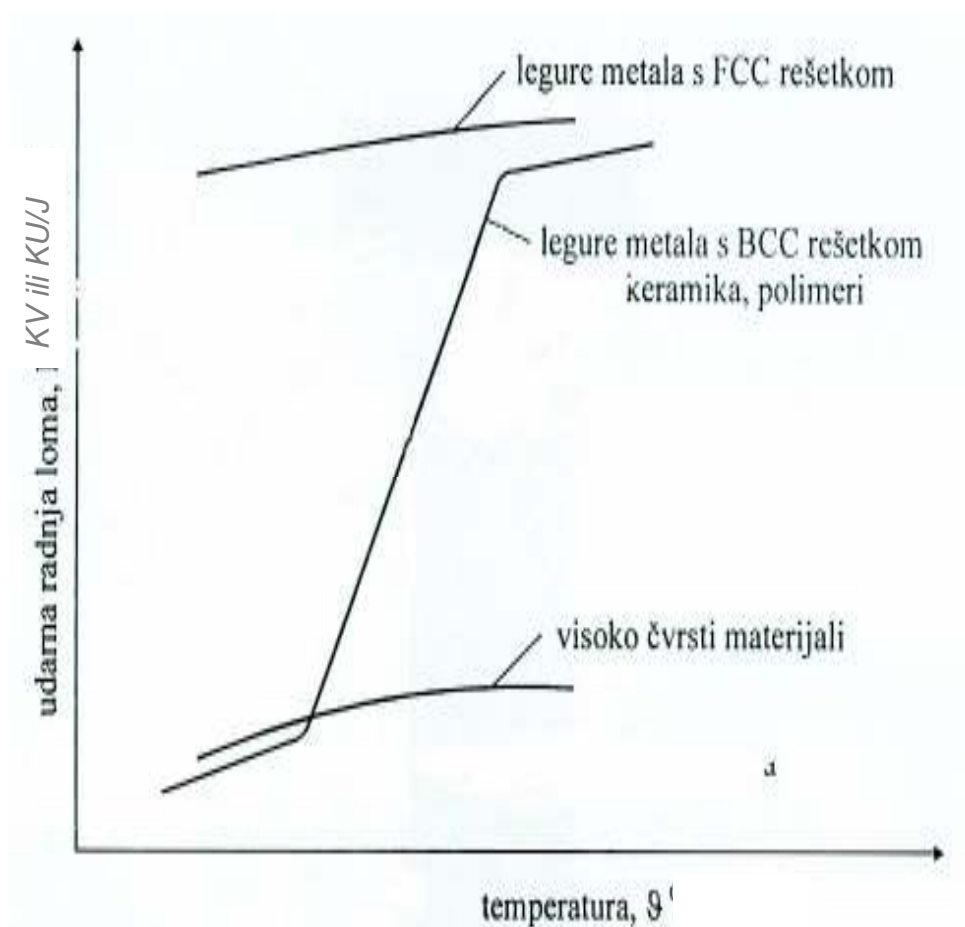
Parametri u primjeni materijala:

- **Radni uvjeti (radna temperatura)**

- **Vrsta materijala**
 - kemijski sastav
 - nečistoće u čeliku
 - struktura
 - Toplinska ili termomehanička obradba

Kemijski sastav

- Kristalna rešetka
- Legirajući elementi



legure s FCC rešetkom
- visoka žilavost

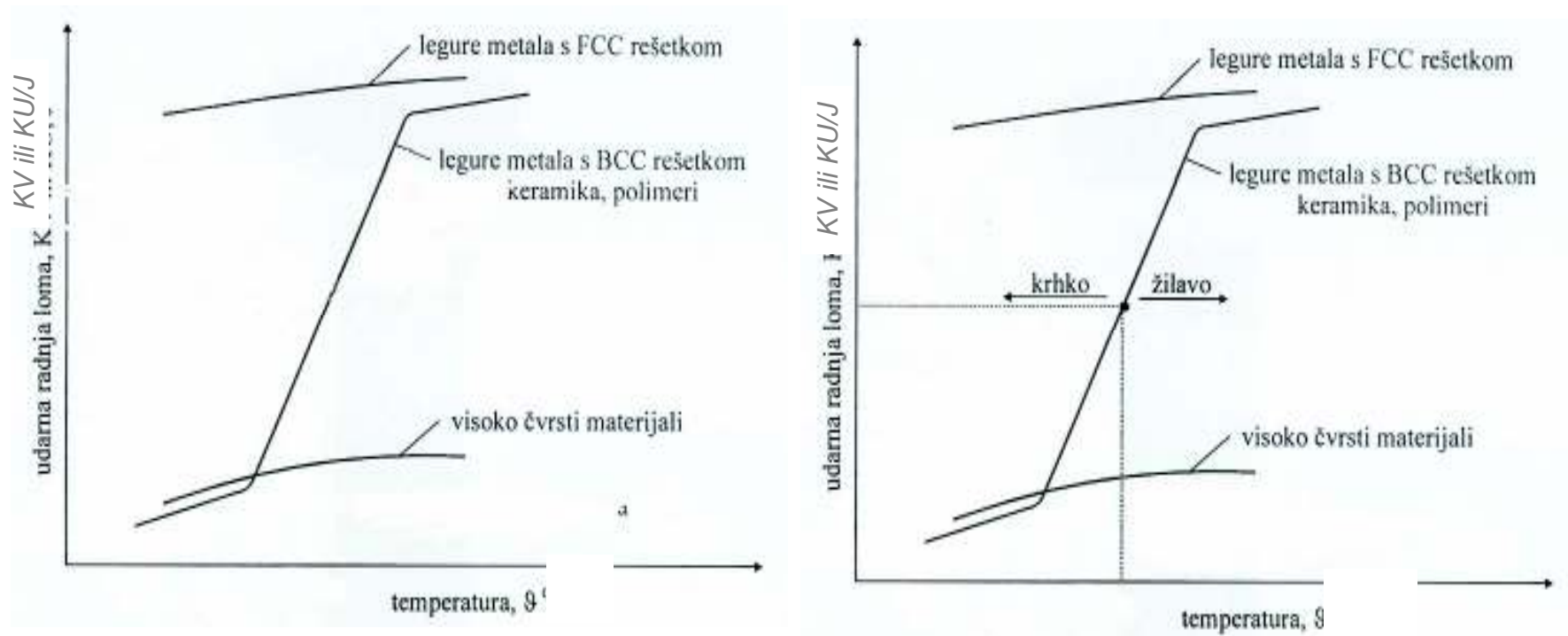
visokočvrsti materijali
– niska žilavost

legure s BCC rešetkom
-žilavost ovisi o
temperaturi

Slika 4.39: Utjecaj kemijskog sastava na veličinu udarnog rada loma

Utjecaj temperature:

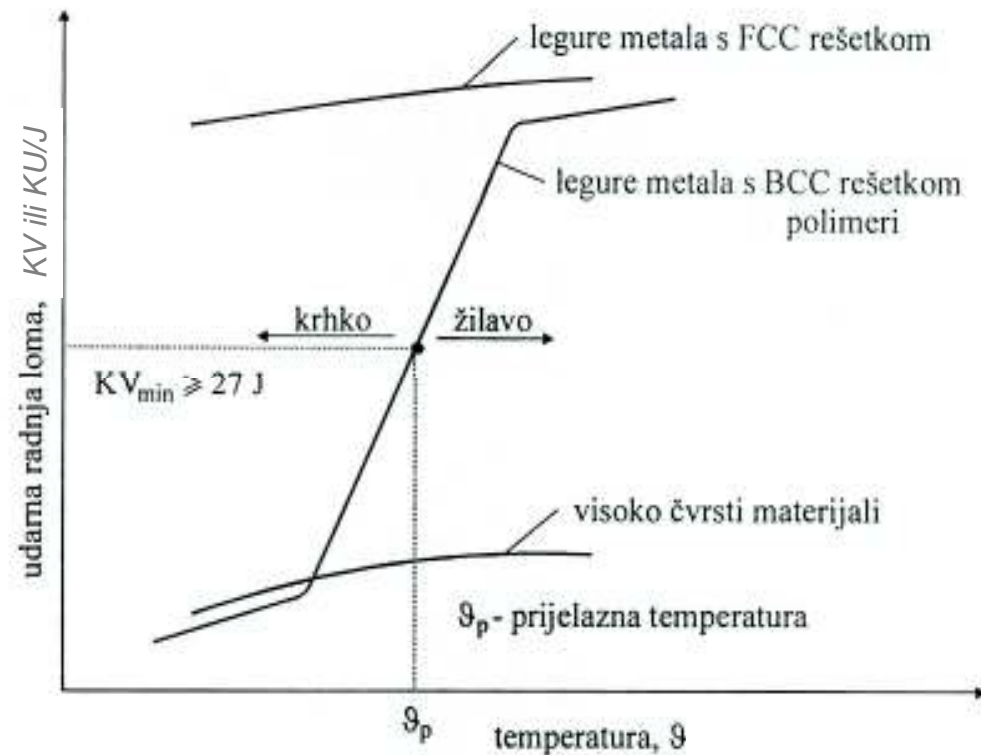
- temperatura ima najveći utjecaj na žilavost.
- sniženjem temperature žilavost materijala opada



Slika 4.40: Utjecaj kemijskog sastava i temperature na veličinu udarnog rada loma

Prijelazna temperatura ispitivanja, (ϑ °C)

- označava visinu temperature na prijelazu s visokih prema niskim vrijednostima udarnog rada loma, odnosno to je temperatura koja odvaja područje žilavog od područja krhkog ponašanja materijala.



Slika 4.41: Određivanje prijelazne temperature

- **Temperatura nulte duktilnosti** je zapravo mjera žilavosti materijala.
- To je ona najviša temperatura pri kojoj mikropukotina počinje rasti i prodira kroz čitav presjek ispitnog uzorka.
- Na toj temperaturi gube se svojstva plastičnosti čelika.
- Ispod temperature nulte duktilnosti očekuje se krhko, a iznad žilavo ponašanje materijala.
- **Granična temperatura ($v_{50\%}$ i $v_{85\%}$)**
- Ispituje se na ispitnim uzorcima s utorom
- Najčešće se provodi na limovima i feritnim čelicima

- **Utjecaj strukture**

Mikrostruktura ima velik utjecaj na žilavost.

Naročito povoljno na žilavost utječe smanjenje zrna.

Smanjenje veličine zrna za 1 po ASTM skali snižava prijelaznu temperaturu za 15 ° C.

- Veću žilavost odnosno nižu prijelaznu temperaturu ima deformirani materijal zbog anizotropije strukture osobito u uzdužnom pravcu.

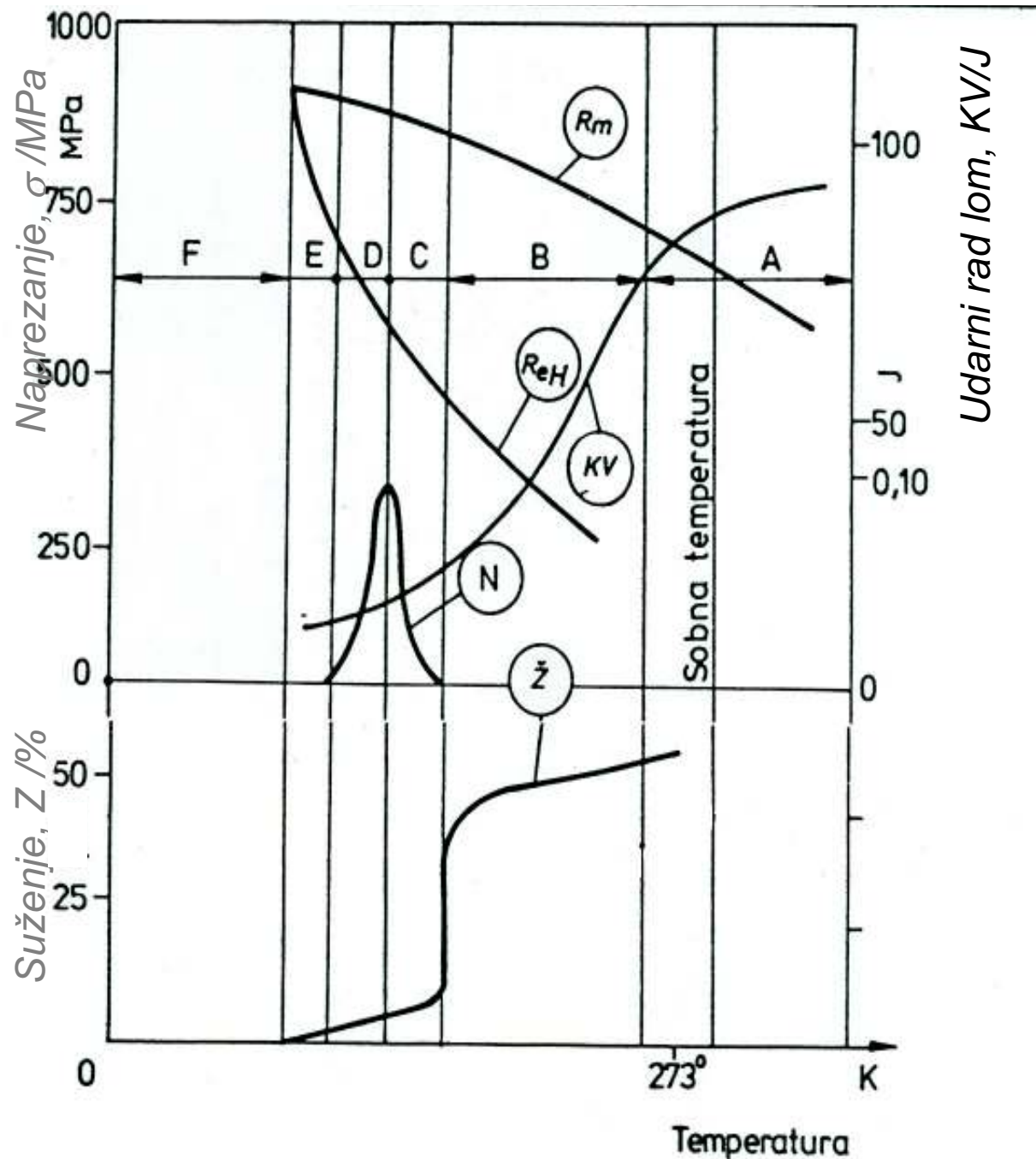
- **Krhki lom**

- djelovanjem naprezanja ne postoji plastična deformacija već se inicijalna mikropukotina širi duž kristalne ravni,
- osim sklonosti samog materijala krhki lom se javlja kod sniženih temperatura i velikih brzina naprezanja.

- **Žilavi lom**

- prisutna je intenzivna plastična deformacija u svim etapama loma.
- nastaje pri malim brzinama djelovanja naprezanja i pri naprezanju koje je znatno iznad granice razvlačenja

- A - žilav lom
- B - pojava stabilnih mikropukotina - žilav lom
- C - nagla promjena suženja ispitnog uzorka raste broj stabilnih pukotina - pojava i krhkog i plastičnog loma
- D - nestabilne mikropukotine - mješovit lom
- E - nestabilne mikropukotine - uglavnom krhki lom
- F - krhki lom



Slika 4.42: Međuviznost žilavosti i mehaničkih svojstava materijala

Lomna žilavost

- Mjera za lomnu žilavost je kritični intenzitet naprezanja na vrhu pukotine koji dovodi do njenog nestabilnog širenja.
- Od svih karakteristika koje određuju žilavost, jedino lomna žilavost može poslužiti kao proračunska veličina.
- Ispituje se na ispitnom uzorku koja uz utor ima i umjetno izazvanu pukotinu umaranjem dubine $\geq 1,3\text{mm}$.

4.2.1.1.3. Metode ispitivanja materijala udarom

- Metode za ispitivanje udarom su:
 - udarni rad loma po Charpy-ju
 - udarni rad loma po Izodu
 - temperatura nulte duktilnosti po Pelliniju
 - dinamička sila loma po Bruggeru
 - tehnološka ispitivanja udarom

4.2.1.1.3.1. Ispitivanje udarnog rada loma po Charpy-u

- Metoda za ispitivanje udarnog rada loma po Charpyju je vrlo primjenjivana metoda.

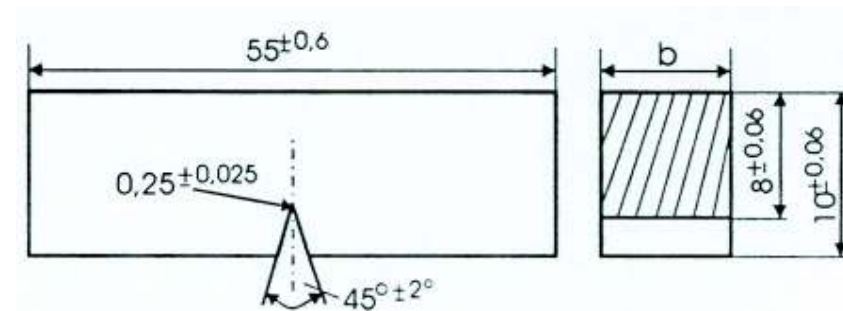
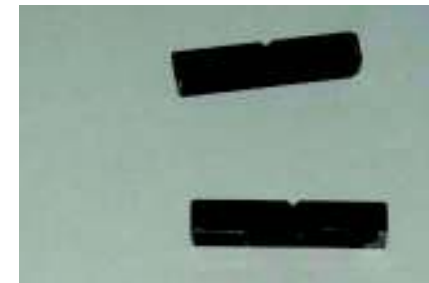
Uređaj na kojem se ispituje žilavost je Charpyjevo klatno

Slika 4.43: Charpyjevo klatno

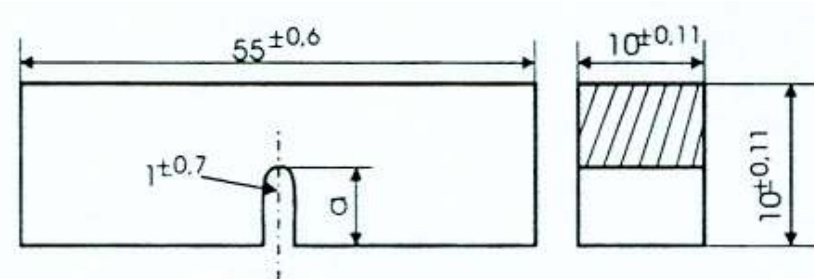


Oblik i dimenzija ispitnog uzorka

- Oblik i dimenzije ispitnog uzorka propisane su normom HRN EN 10045-1
- Standardni ispitni uzorak 10x10x55 mm
- Mogu biti sa V ili U zarezom



V – zarez



U – zarez

Slika 4.44: Standardni ispitni uzorci za ispitivanje po Charpyju

Tablica 4.3: Oblik i dimenzija ispitnih uzoraka

	V-zarez	U-zarez
Dužina, mm	55	55
Visina, mm	10	10
Širina, mm – standardni ispitni uzorak - uski ispitni uzorak	10 7,5 5	10
Dubina zareza, mm	2	5 (3) (2)
Nagib kuta zareza	45	
Radijus u korienu zareza	0,25	1

Određivanje veličine udarnog rada loma

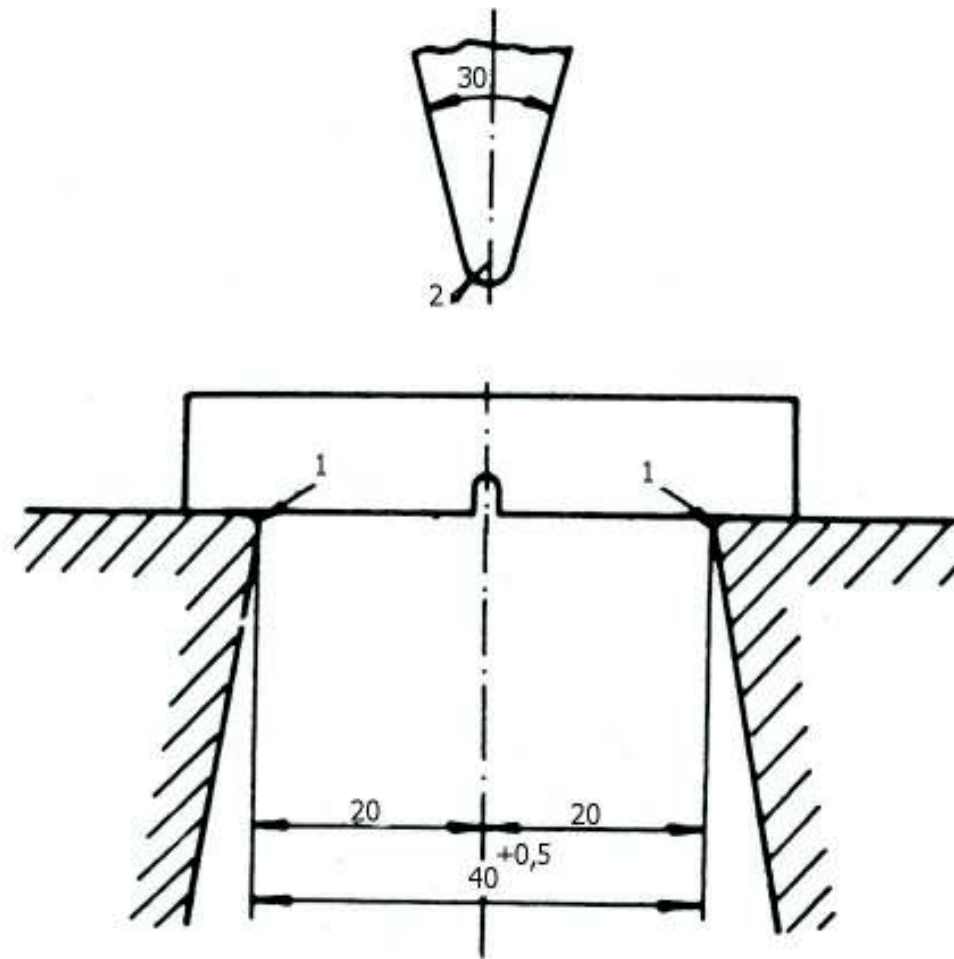
- Postavljanje ispitnog uzorka

Kod ispitivanja je važno provjeriti da je ispitni uzorak postavljena točno nasuprot vrha bata

- Provjera klatna

$$\beta < \alpha$$

za 1%



Slika 4.45: Položaj ispitnog uzorka i bata kod ispitivanja po Charpyju

U početnom položaju energija klatna je

$$E_{pot} = G \cdot h_1 / J$$

Nakon što klatno počne padati njegova potencijalna energija se pretvara u kinetičku, E_{kin} . Dio kinetičke energije troši se za udarni rad loma ispitnog uzorka, a s preostalom energijom klatno nastavlja otklon do visine h_2 .

$$KU/KV = G(h_1 - h_2) / J$$

Udarni rad loma je:

R - dužina klatna

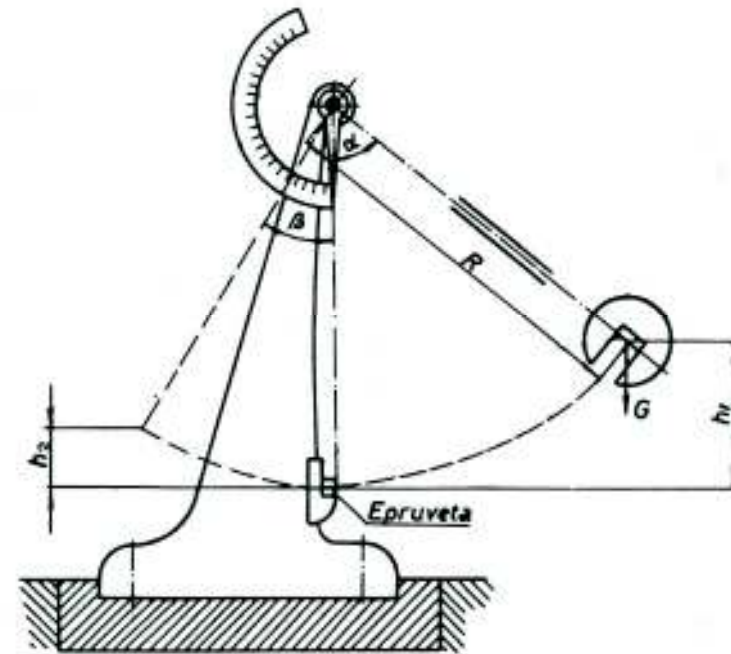
G – masa klatna

α - kut otklona klatna u početnom položaju

β - kut otklona klatna nakon loma ispitnog uzorka

h_1 – početna visina klatna

h_2 – visina klatna nakon loma ispitnog uzorka



- Ako se mjeri kut odklona klatna onda je:
udarni rad loma

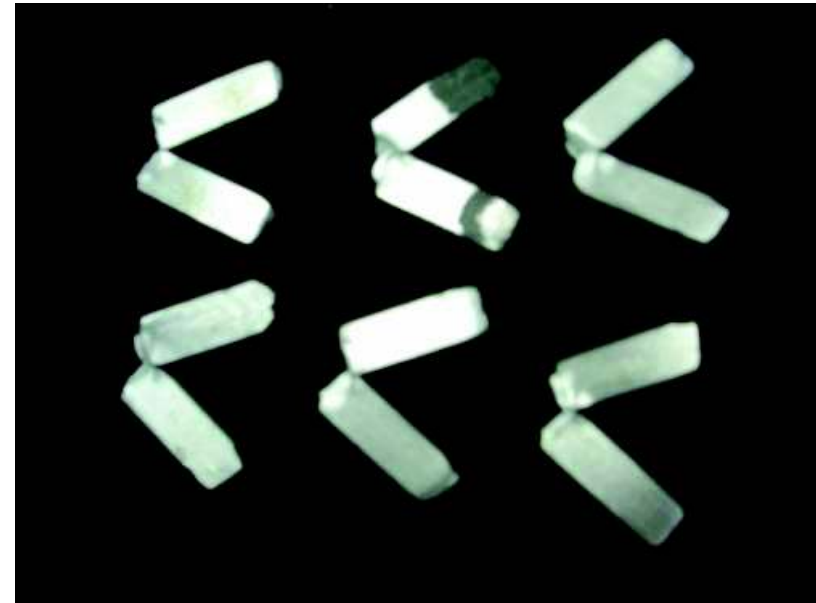
$$KU / KV = GR(\cos \beta - \cos \alpha) / J$$

gdje je : α - kut u položaju mirovanja klatna
 β - kut odklona klatna nakon loma
ispitnog uzorka
 R - radijus klatna

***Mjera žilavosti materijala je
udarni rad loma.***

Žilavost se izračunava:

$$K_{(U):(V)} = \frac{KU(KV)}{S} / \frac{J}{\text{cm}^2}$$



Slika 4.47: Ispitni uzorci nakon loma

gdje je : $K_{(V)(U)}$ – žilavost , J/cm²

ispitana na ispitnim uzorcima s (V) ili (U) zarezom

KU / KV - udarni rad loma ispitnog uzorka s V
ili U zarezom , J

S - ploština ispitnog uzorka iznad zareza, cm²

Ispitivanje udarnog rada loma na sniženim temperaturama

- Ispitni uzorci se hlade na temperaturu ispitivanja:
 - do $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$
tekući CO_2 + alkohol
(suhi led)
 - do $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$
tekući dušik + alkohol



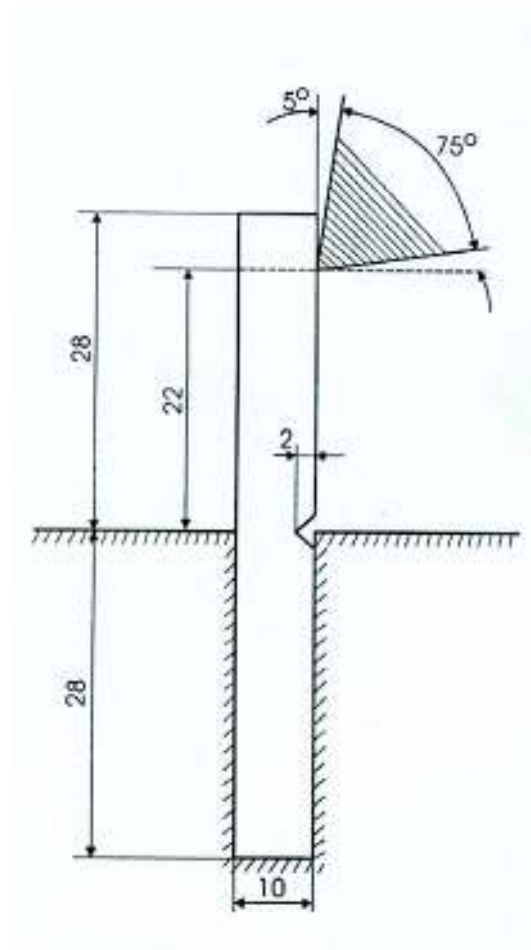
Slika 4.48: Hlađenje ispitnih uzoraka na temperaturu ispitivanja

- U europskim zemljama, izuzev V. Britanije, udarni rad loma se ispituje po Charpyju.
- U V. Britaniji i donekle u SAD upotrebljava se metoda Izoda.

4.2.1.1.3.2. Ispitivanje udarnog rada loma po Izodu

Položaj ispitnog uzorka kod ispitivanja po Izodu

Ispitni uzorak s V zarezom učvršćena je samo s jedne strane. Bat njihala udara ispitni uzorak sa strane zareza, a za osnovnu potencijalnu energiju uzima se 150 J .



Slika 4.49: Princip ispitivanja po Izodu

4.2.1.1.3.3. Ispitivanje udarom po Pelliniju

- Pellinijeva metoda ispitivanja padajućim utegom primjenjuje se kod ispitivanja temperature nulte duktilnosti. Ispitivanje se provodi na ispitnim uzorcima s navarom u kojima je urezan zarez.

4.2.1.1.3.4. Ispitivanje udarom po Bruggeru

- Ova metoda nije normirana, a upotrebljava se u Njemačkoj i Švicarskoj za čelike koji služe za izradu zupčanika za mjenjače.
- Ispitni uzorci za ispitivanje po Bruggeru su okrugle s promjerom od 25 mm i duljinom 60mm.
- Na krajevima imaju "zube" dimenzija 7 x 20mm.
- Ispitivanje se provodi batom obično potencijalne energije 150J pod kutom 30 °.

4.2.1.1.3.5. Tehnološka ispitivanja udarom

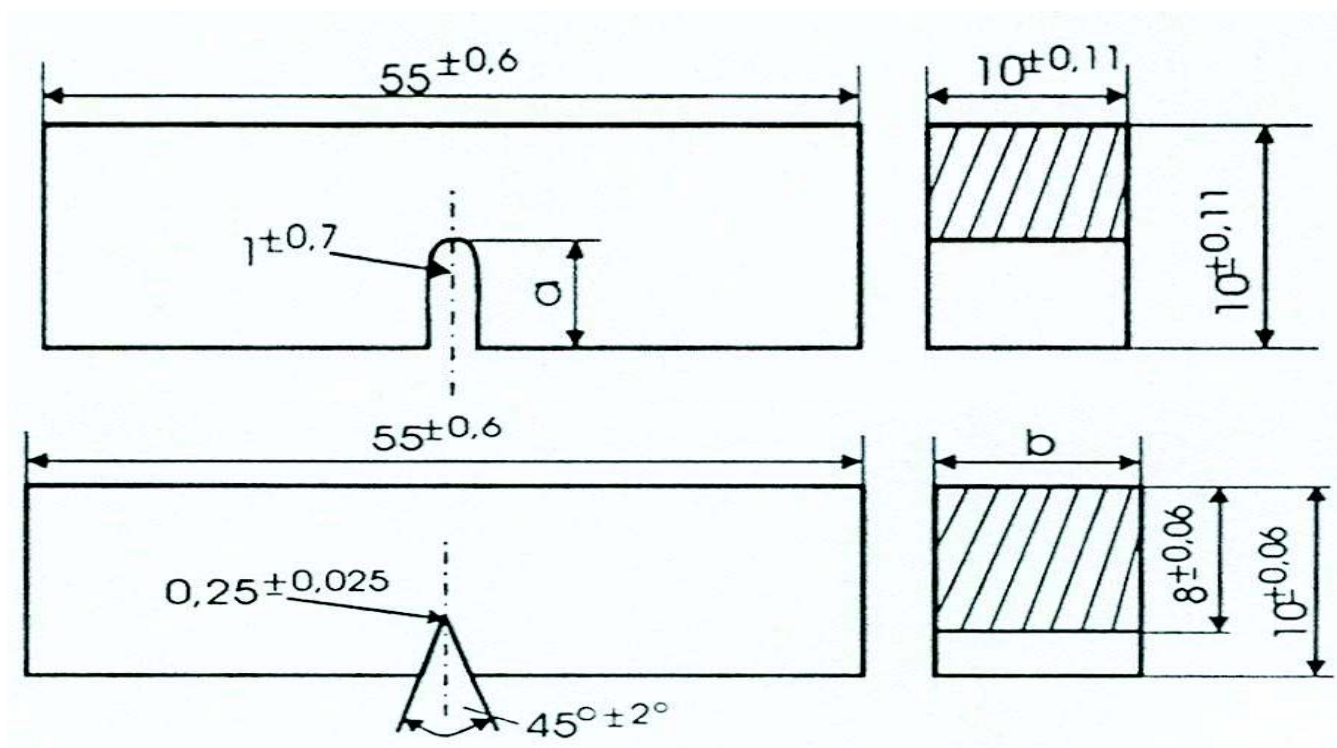
- Na uzorcima isječenim iz gotovog proizvoda (npr. željeznička tračnica, vagonске osovine itd.) utvrđuje se otpornost na udarno opterećenje. Ispitivanje se provodi maljem propisanih mjera na temperaturama 10 do 25 °C.
- Ispitivani uzorak ne smije se slomiti niti pokazati mikropukotine.

4.2.1.1.4. Utjecajni parametri kod ispitivanja udarnog rada loma

- temperatura ispitivanja
- oblik i dimenzije ispitnog uzorka i zareza
- brzina udara

Utjecaj oblika i dimenzija ispitnog uzorka i zarezom

- Dimenzije ispitnog uzorka različito utječu na žilavost materijala. Najmanje utječe duljina ispitnog uzorka, dok širina i debljina imaju sličan utjecaj.
- Oblik i dimenzije ispitnog uzorka propisane su normom HRN EN 10045-1



Slika 4.50: Ispitni uzorci s U i V zarezom

Standardno ispitivanje - prema EN 10045 -1

- Ispitni uzorci 10x10x55mm s V ili U zarezom
 - dubina U zareza od 5mm
 - dubina V zareza je 2mm (slika 4.50)
 - energija klatna 300 J
 - Udarni rad loma KV ili KU/J
- U slučaju kad je debljina materijala manja od 10 mm, koriste se tanki ispitni uzorci s V zarezom od 7,5 i 5mm
 - Udarni rad loma se označava s KV, a kod kratkih ispitnih uzoraka:

KV 300/7,5* ili *KV 150/5

- Kada se koriste ispitni uzorci s plicim U zarezom, dopunjava se oznaka udarnog rada loma:

KU 300/3* ili *KU 150/2

Oznaka *KU 300/3* se vrlo često koristi kod ispitivanja čelika za poboljšanje.

Utjecaj brzine udara

- Brzina udara:

$$v = \sqrt{2Gh_1} = \sqrt{2GR(1 - \cos \alpha)} / \text{ms} - 1$$

Gdje je : H_1 - početna visina bata, m

α - početni kut pada bata

R - duljina nosača Charpy bata, m

- Ispitivanje po Charpy najčešće se izvodi brzinom $v = 5 - 5,5$ m/s

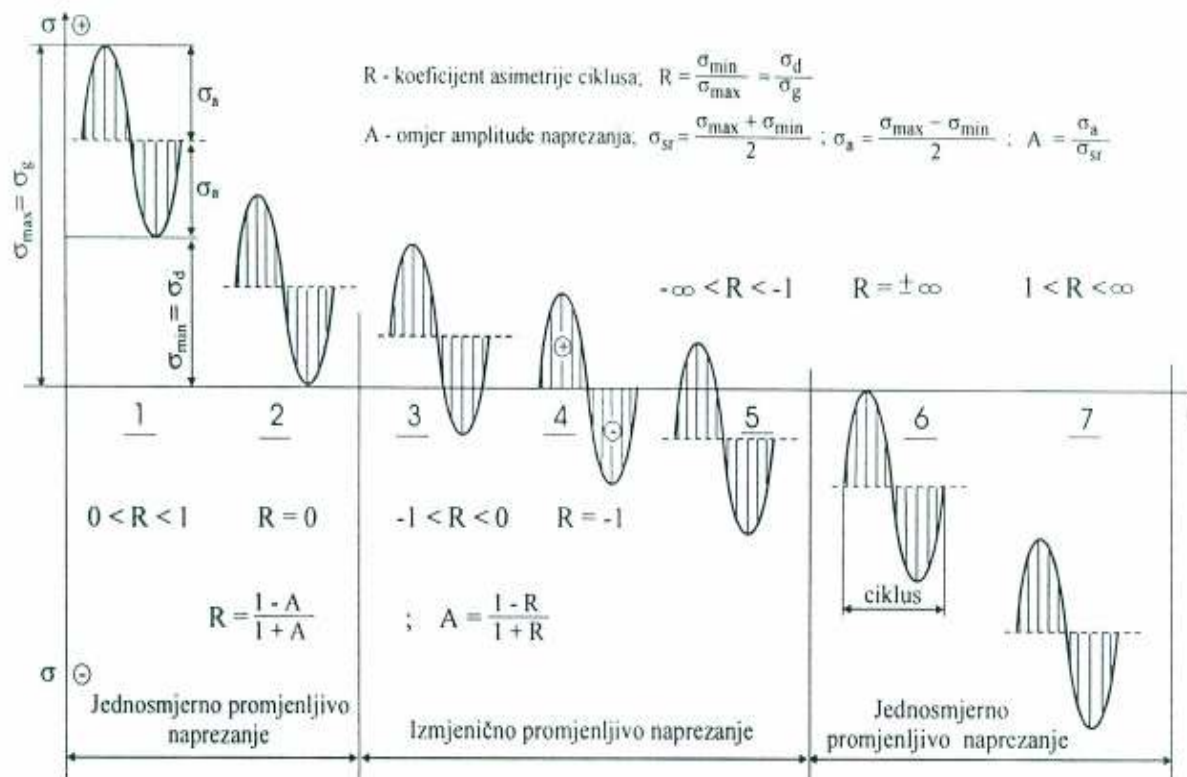
To je obično konstanta bata.

NORME

- HR EN 10045, 1 i 2 dio, ispitivanje udarnog rada loma po Charpyju
- DIN 50115, ispitivanje udarnog rada loma
- DIN 50115, ispitivanje udarnog rada loma Zn i njegovih legura
- DIN 50122, ispitivanje udarnog rada loma zavarenih spojeva

4.2.2.1. UMOR MATERIJALA

Umor materijala je pojava postupnog oštećenja materijala uslijed dugotrajnih periodičnih promjenljivih opterećenja (naprezanja).

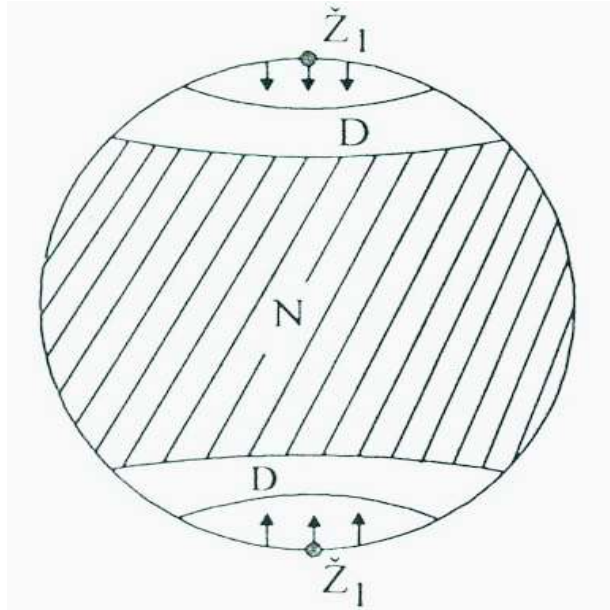


Slika 4.51: Osnovni tipovi promjenljivih naprezanja

Pojava umaranja materijala i njezine posljedice

- 80 – 90 % svih lomova imaju karakter loma od umora materijala.
- utjecaj promjenljivih opterećenja može biti praćen i visokim ili niskim temperaturama i istovremenim djelovanjem agresivnih medija
- inicijalne pukotine koje nastaju kod umora materijala su najoštrije prirodne pukotine koje se teško mogu otkriti prije loma.
- lom uslijed umora materijala počinje na mjestu najveće koncentracije naprezanja.

Karakteristična prijelomna ploština od umora materijala prikazana je na sljedećoj shemi:



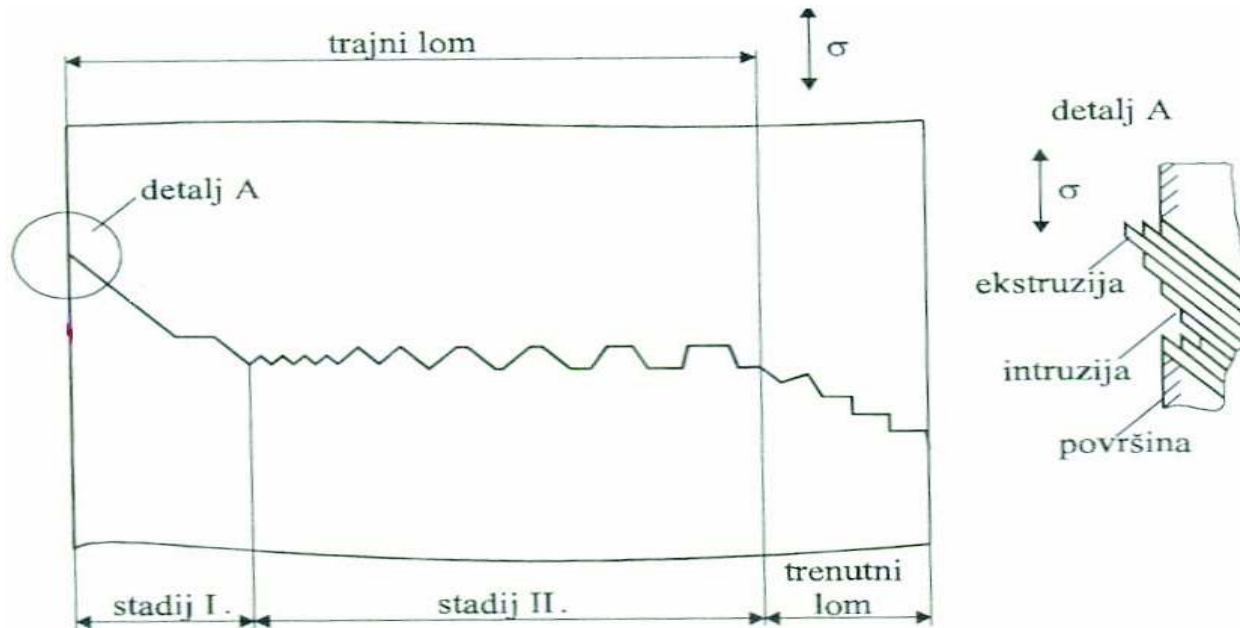
Slika 4.52: Razvoj loma

- Prijelomna ploština sastoji se od:
 - a) zaglađenog svijetlog dijela (D) područja trajnog loma i
 - b) hrapavog, zagasitog i zrnastog sloja (N)

Lom se širi od žarišta (Ž) koncentričnim kružnicama sve dok preostali dio presjeka (N) ne može podnijeti prisutno opterećenje i dovodi do loma.

4.2.2.1.1. **Mehanizam oštećenja materijala pri umaranju**

- Objašnjenje mehanizma procesa umaranja materijala vrlo je složeno i u uskoj je svezi s ponašanjem grešaka u kristalnoj rešetci.
- Pod djelovanjem dugotrajnog dinamičkog naprezanja u materijalu nastaju linije klizanja. To je znak da je došlo do lokalne plastične deformacije u centru maksimalnih naprezanja (vrh inicijalne pukotine u materijalu).
- Na tim mjestima dolazi do očvršćivanja materijala i kod daljnjeg periodičnog opterećenja nastaje inicijalna mikropukotina koja se širi sve dok se nosivi presjek ne smanji toliko da maksimalna vrijednost promjenljivog naprezanja može izazvati trenutni lom.

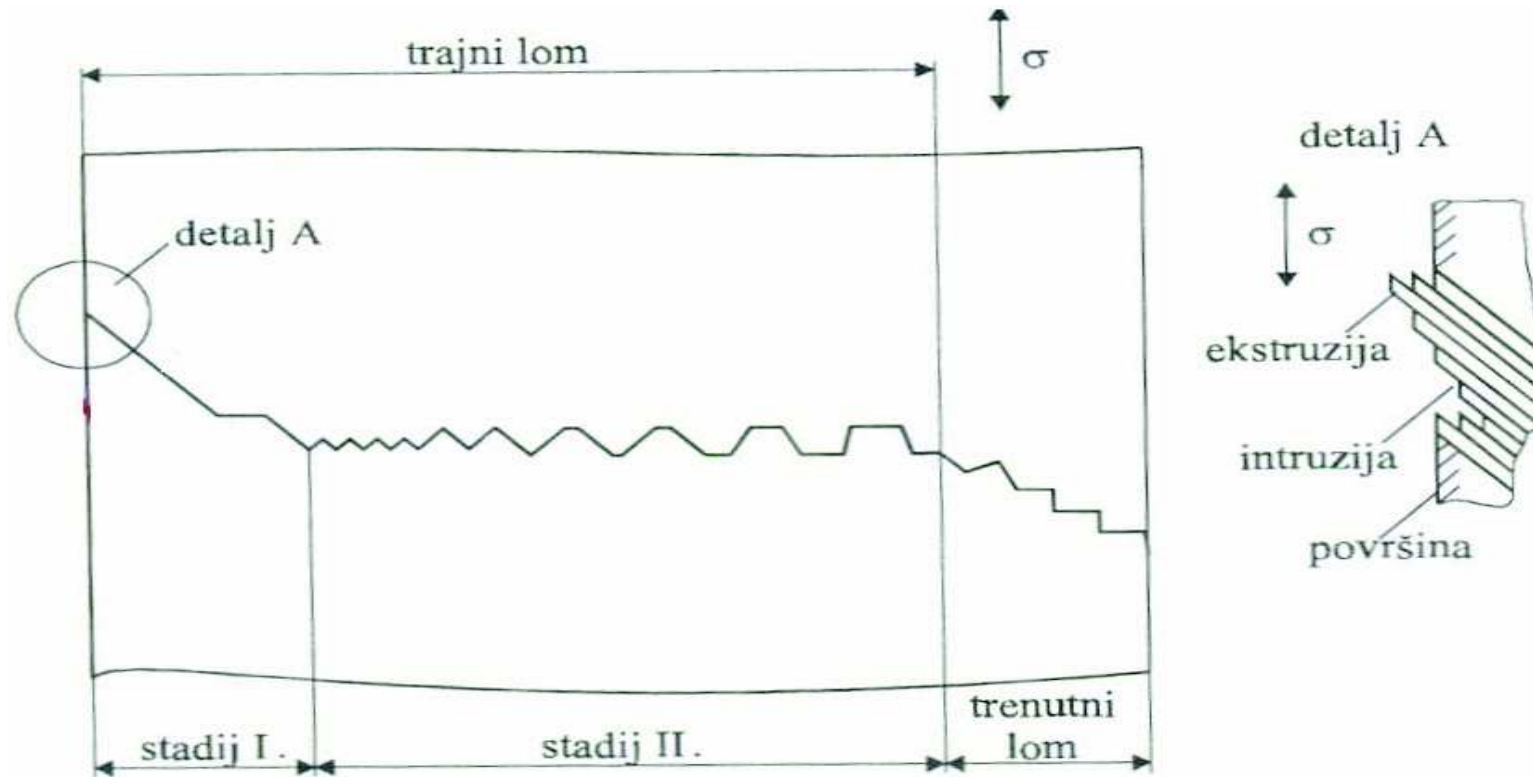


Slika 4.53: Shematski prikaz nastanka loma od umora materijala

■ **Prvi stadij** - pojava linije klizanja naziva se ranim ili prvim stadijem umora materijala.

U ovisnosti od vrste materijala i amplitude napreznja ona traje 0,5 do 5% daljnjeg ukupnog vijeka trajanja strojnog dijela.

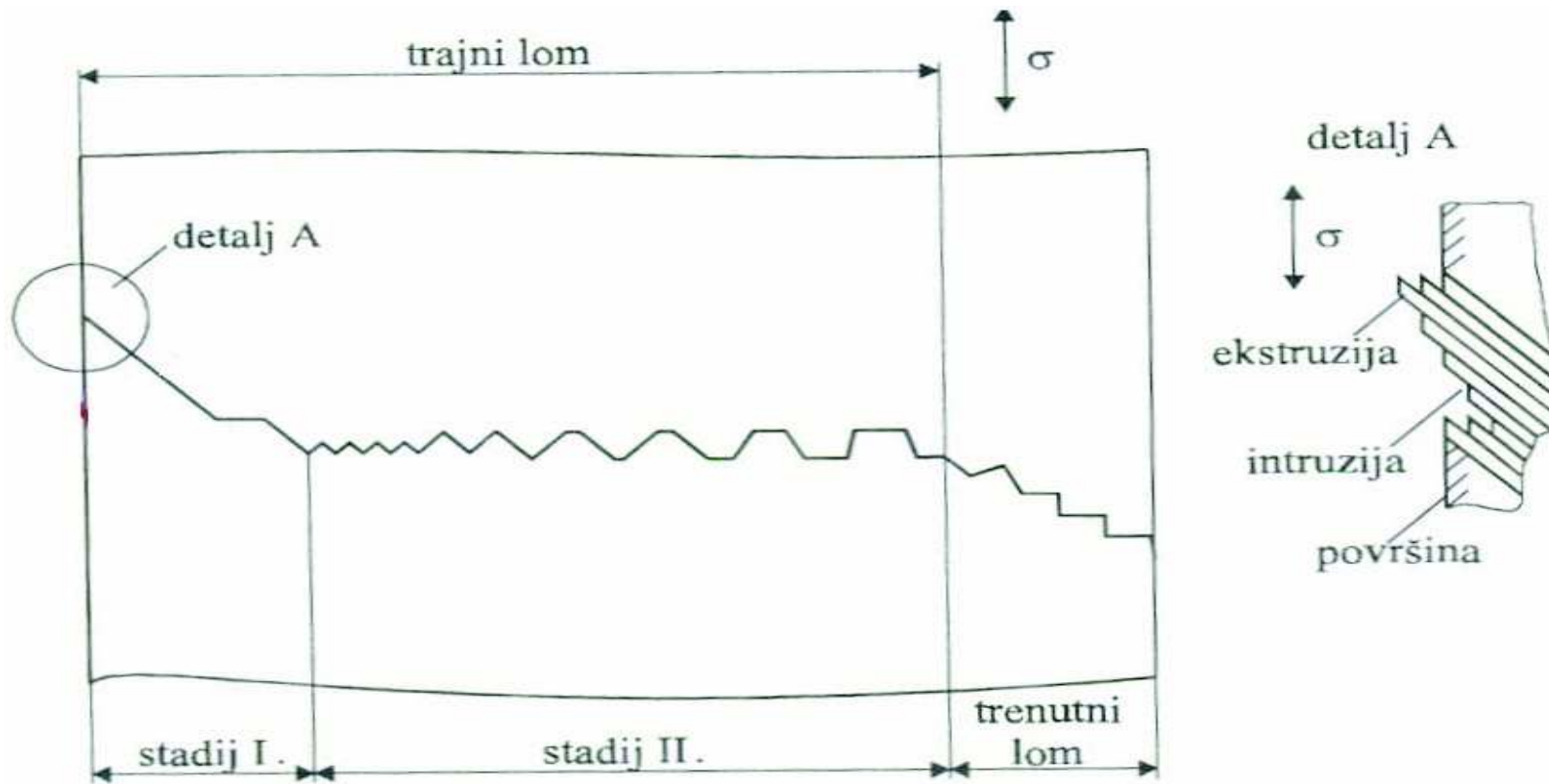
Do očvršćivanja dolazi onda kada je napreznje blizu napreznja tečenja materijala.



Slika 4.54: Shematski prikaz nastanka loma od umora materijala

U drugom stadiju

- nastaju grube brazde klizanja
- na površini se javljaju udubljenja - ekstruzije i ispupčenja –intruzije



Slika 4.55: Shematski prikaz nastanka loma od umora materijala

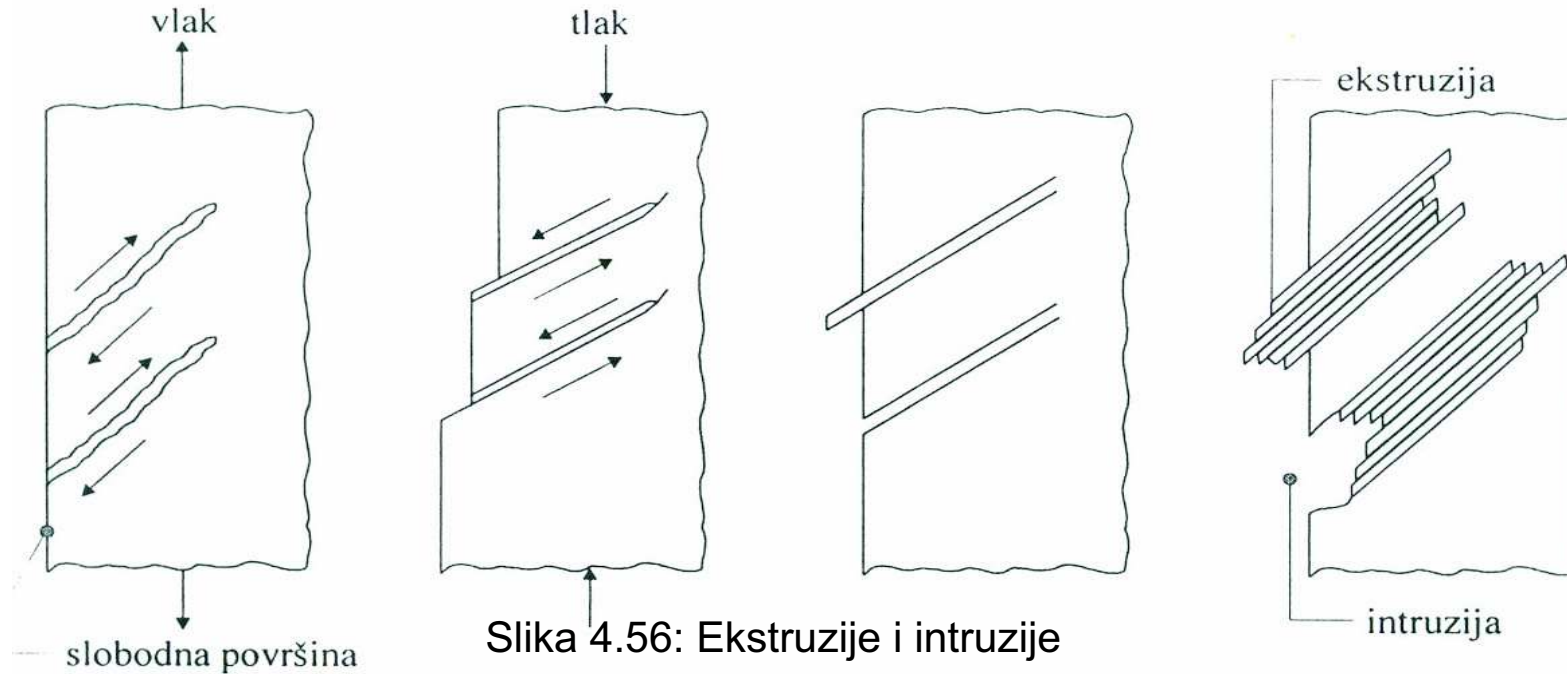
■ U trećom stadiju

- dolazi do širenja pukotine i pretpostavlja se da se ona odvija na sličan način kao nukleacija pukotine.

4.2.2.1.2 Teorije nastajanja inicijalne pukotine

- nastajanja ekstruzija i intruzija
- teorija dislokacija

Nastajanja ekstruzija i intruzija

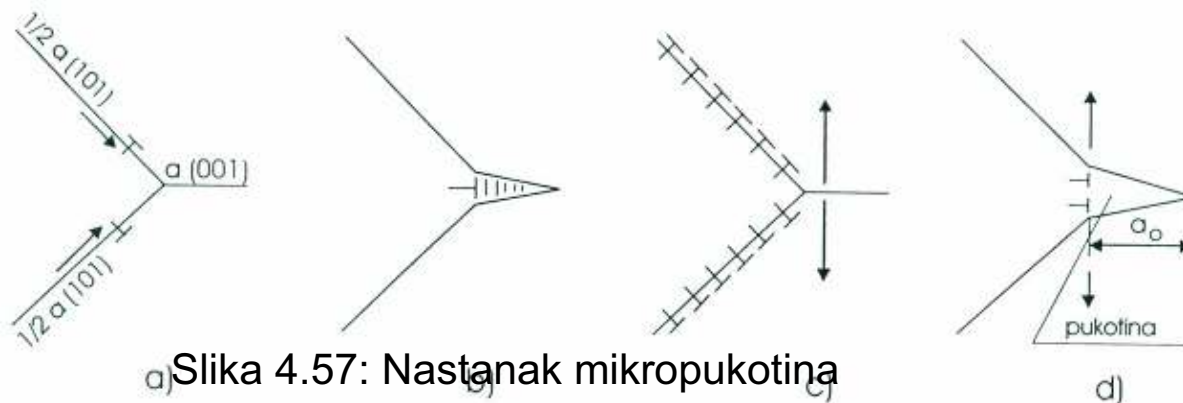


- Za ispitne uzorke idealne glatke površine žarišta loma je posljedica lokalne nehomogene deformacije uslijed koje dolazi do nastajanja izbočina (ekstruzije) ili udubina (intruzije) na površini ispitnog uzorka.

- Takve neravnine na površini , osobito udubine, su potencijalna mjesta za nastajanje inicijalnih pukotina u materijalu.
- Inicijalna pukotina nastala na površini širi se kod materijala sa kristalnom strukturom pod kutom $\approx 45^\circ$ u odnosu na normalno naprezanje , tj. u smjeru maksimalnog smičnog naprezanja.
- Takav način širenja pukotine prisutan je samo kod nekoliko kristalnih zrna.
- Brzina širenja pukotine u ovom stadiju ovisi o okolnom mediju.
- Pri ispitivanju na zraku brzina širenja pukotine iznosi $\approx 10^{-7}$ mm/ciklusu naprezanja.

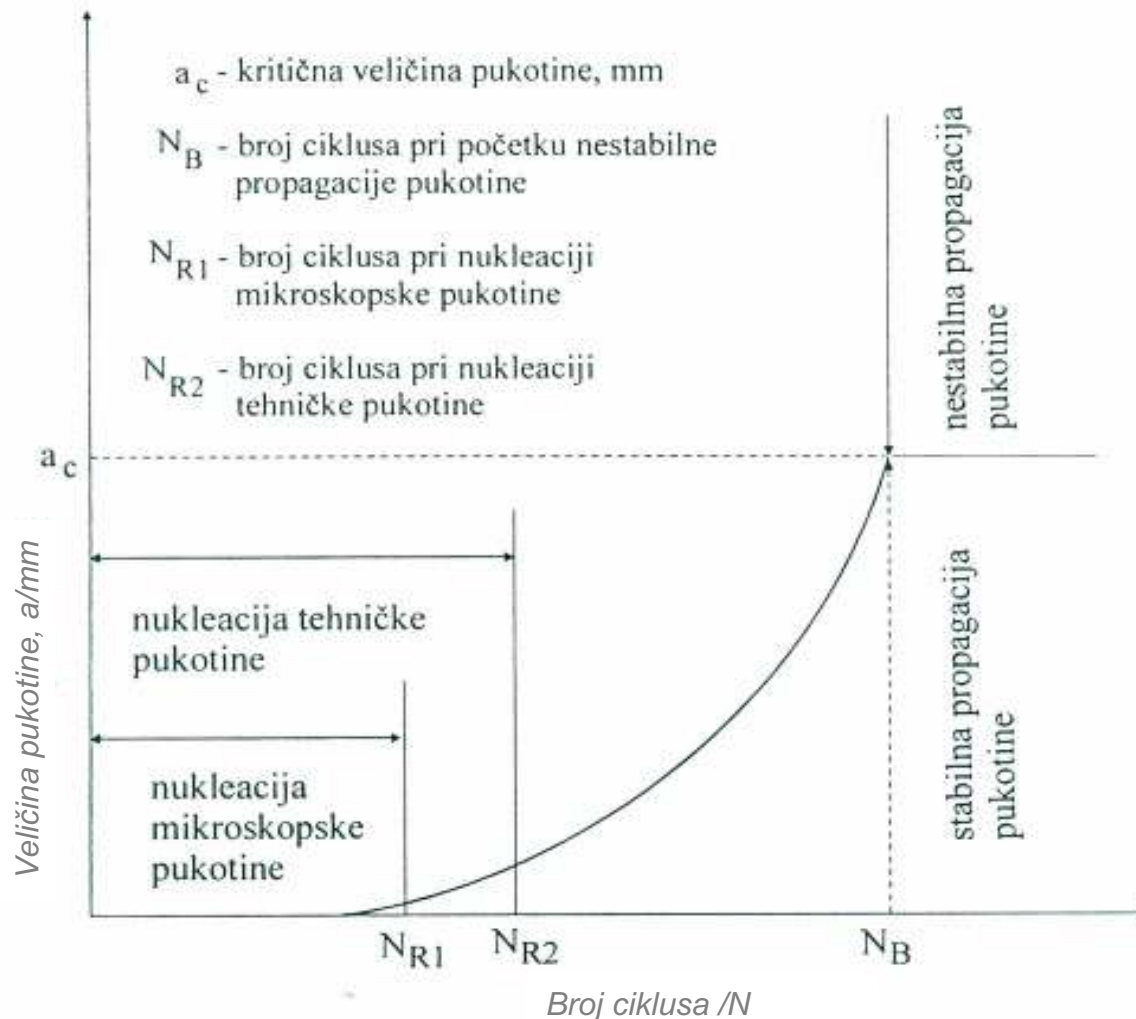
Teorije dislokacija

- Dislokacijske teorije tumače nastajanje inicijalne pukotine uslijed nagomilavanja dislokacija na preprekama koje blokiraju njihovo kretanje.
- Prema Cottrellovoj teoriji prepreka je nepokretna dislokacija nastala na mjestu presjeka dvije obične dislokacije u kliznoj ravnini.
- Nepokretna dislokacija zaustavlja klizanja u ravninama koje se sijeku, što izaziva visoku koncentraciju naprezanja dovoljnog za stvaranje kritičnog naprezanja koje će stvoriti mikropukotinu.



a) Slika 4.57: Nastanak mikropukotina

Proces umaranja materijala u području nukleacije mikroskopske pukotine može se podijeliti na 2 faze:

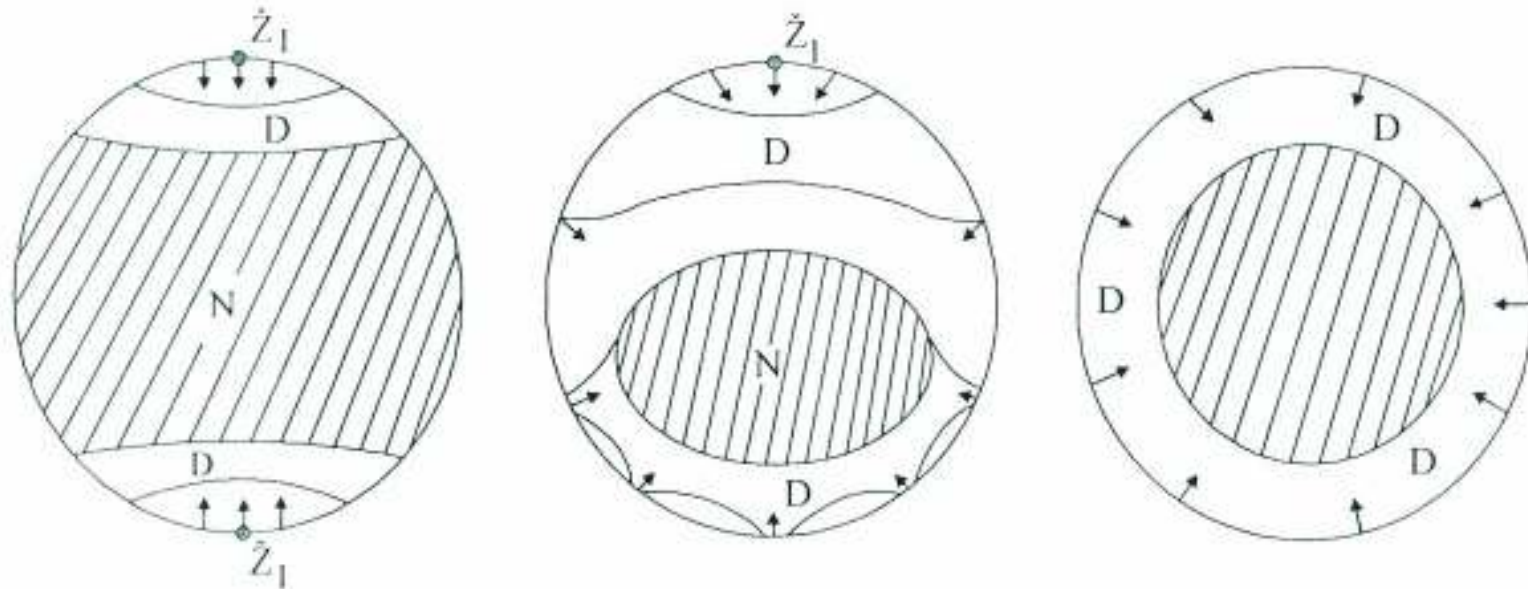


Stabilan rast
pukotine

Nestabilan rast
pukotine

Slika 4.58: Faze procesa umaranja materijala u području nastajanja pukotina

4.2.2.1.3. Tijek i razvoj loma za tri načina naprezanja savijanjem



Slika 4.59: Tijek i razvoj loma materijala umaranjem

- **Tijek razvoja loma pri savijanju**
 - a) dvostrano savijanje (ako je samo jedna zona D onda se radi o jednostranom savijanju)*
 - b) ekscentrično savijanje*
 - c) centrično savijanje*

4.2.2.2. Dinamička izdržljivost

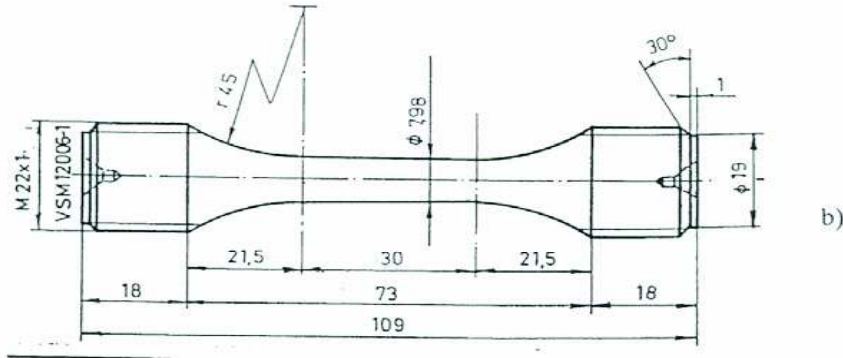
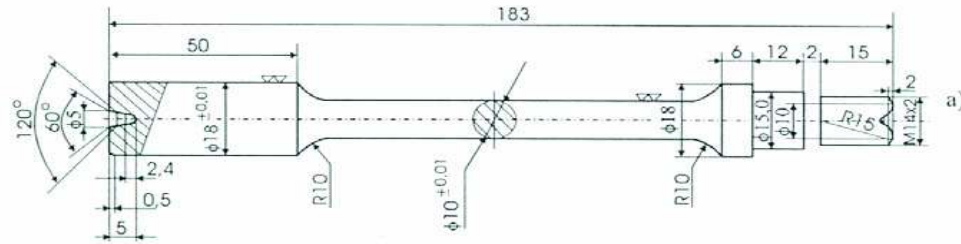
- Mehaničko svojstvo koje karakterizira otpornost materijala prema pojavi umora materijala naziva se ***dinamička izdržljivost***.
- Svrha ispitivanja dinamičke izdržljivosti je utvrđivanje ponašanja strojnog dijela ili konstrukcije u uvjetima dugotrajnog djelovanja dinamičkog (promjenljivog) naprezanja.

4.2.2.2.1. Ispitivanje dinamičke izdržljivosti

- Ispitivanje se provodi na umaralicama (pulzatorima) koji mogu biti :
 - hidraulički,
 - servohidraulički ili
 - na principu elektromagnetske rezonancije.
- Ispitni uzorci za ispitivanje dinamičke izdržljivosti mogu biti okrugle ili pravokutnog poprečnog presjeka.

Posebnu pozornost treba posvetiti izradi i završnoj obradbi ispitnog uzorka zbog jakog utjecaja koncentracijskih naprezanja na dinamičku izdržljivost.

Ispitni uzorci



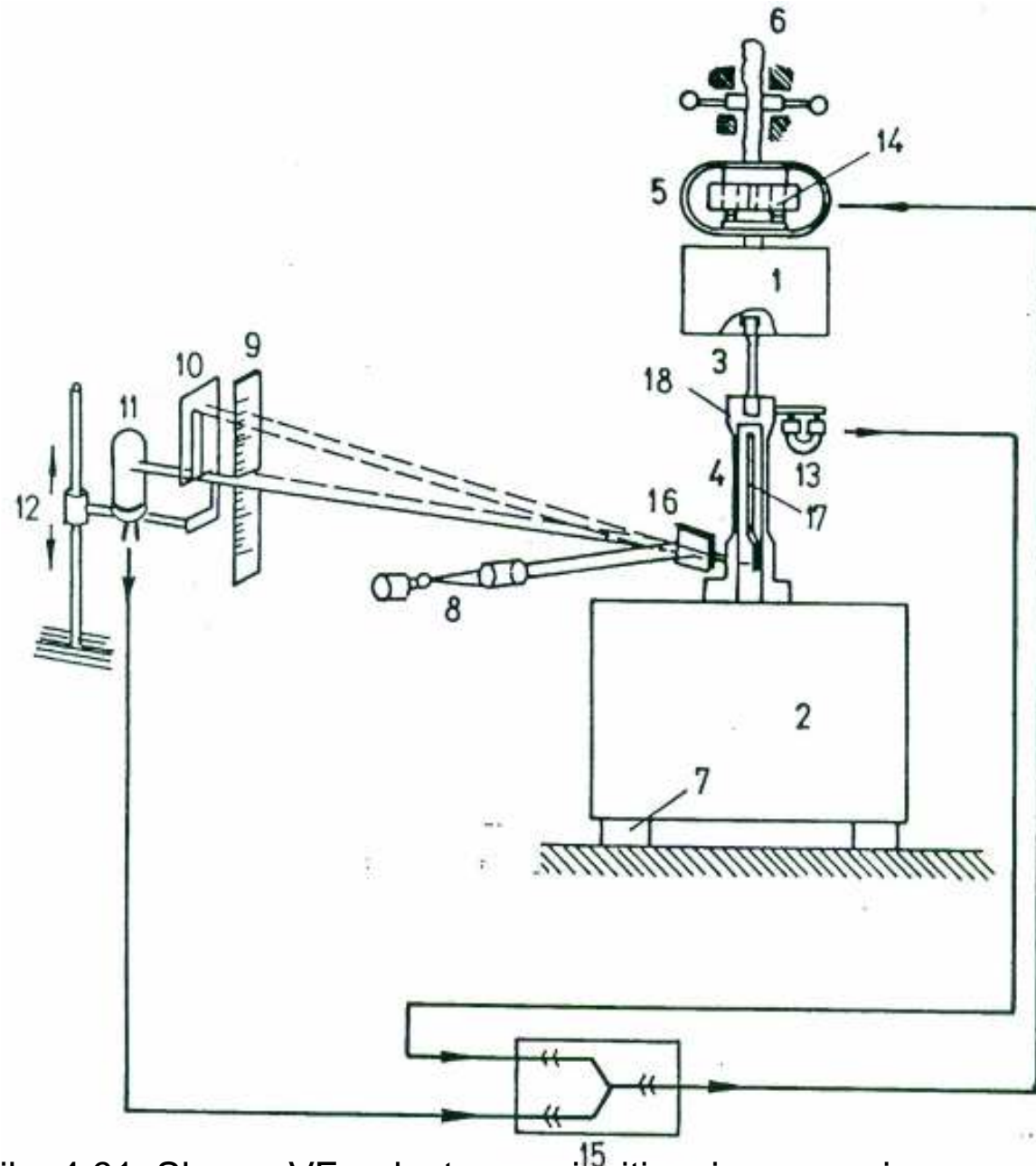
Slika 4.60: Ispitni uzorci

- Oblik i dimenzija ispitnog uzorka ovise i o načinu postavljanja i učvršćivanja ispitnog uzorka u čeljusti stroja.
- Za vlačno – tlačna ispitivanja, ispitni uzorci su ovisni o obliku poluproizvoda , okruglog ili četvrtastog poprečnog presjeka.
- Za obično savijanje rabe se ispitni uzorci četvrtastog poprečnog presjeka.
- Za rotacijsko savijanje ispitni uzorak okruglog poprečnog presjeka.

Strojevi za ispitivanje

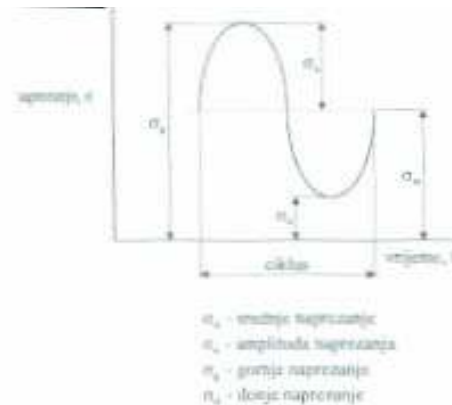
- Ispituje se na uređajima koji omogućuju promjenljivo «titrajno» opterećenje ispitnog uzorka ili strojnih dijelova, a nazivaju se pulzatori ili umaralice. Umaralice rade hidraulički, servohidraulički ili na principu elektromagnetske rezonancije.
- Ukoliko je frekvencija promjene opterećenja «f» manja od 5 Hz, radi se o nisko frekventnom ispitivanju. Ispitivanje s frekvencijom 5Hz do 30 Hz je srednje frekventno, a u koliko je frekvencija veća od 30Hz govori se o visokofrekventnom ispitivanju.

1. Glavna masa
2. Protiv masa
3. Uzorak za ispitivanje
4. Dinamometar
5. Prednaponska opruga magneta
6. Vreteno
7. Podložne opruge
8. Optički sustav
9. Dinamička skala
10. Blenda
11. Fotoćelija
12. Klizač fotoćelije
13. Pobudni generator
14. Pogonski magnet
15. Pojačivač
16. Zrcalo
17. Komparativna traka
18. Stezna glava

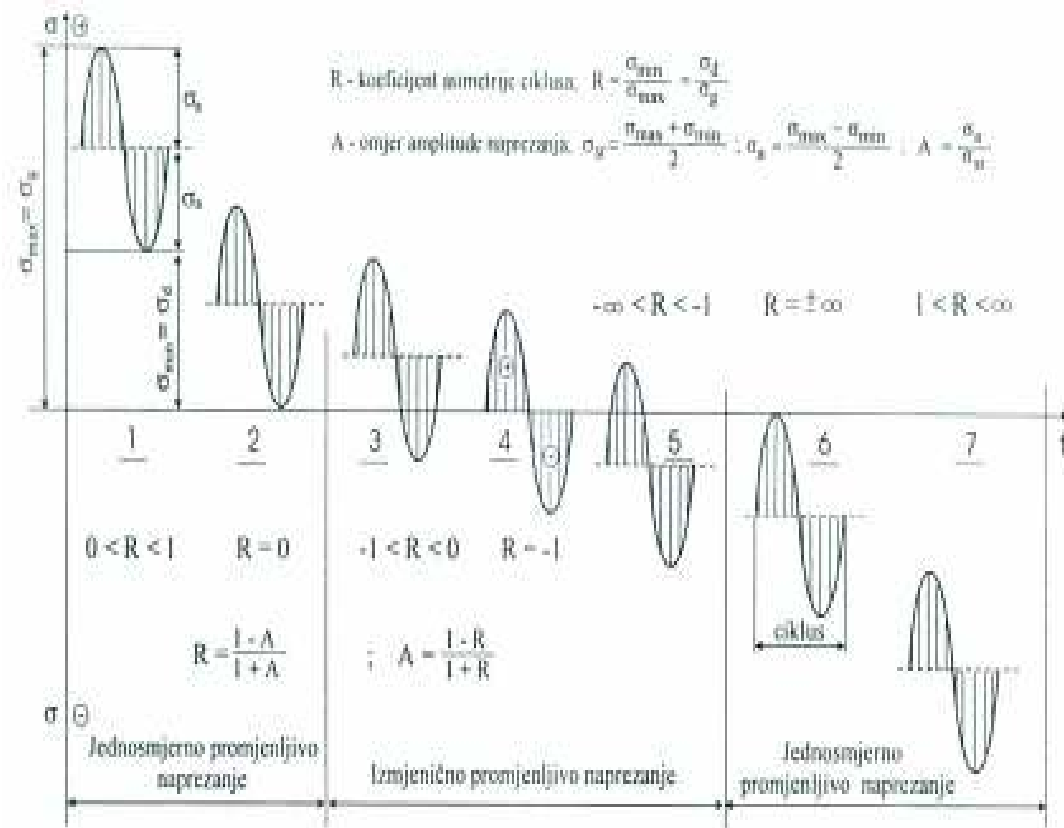


Slika 4.61: Shema VF-pulzatora za ispitivanje umaranjem

- Za ispitivanje dinamičke izdržljivosti najčešće se rabi promjenljivo naprezanje sinusoidnog karaktera, slika 4.62.



- Ovisno o tome odvija li se promjenljivo naprezanje samo u području tlaka, odnosno samo u području vlaka ili pak naizmjenično zadire u oba područja govori se o istosmjernom, odnosno izmjeničnom promjenljivom naprezanju.



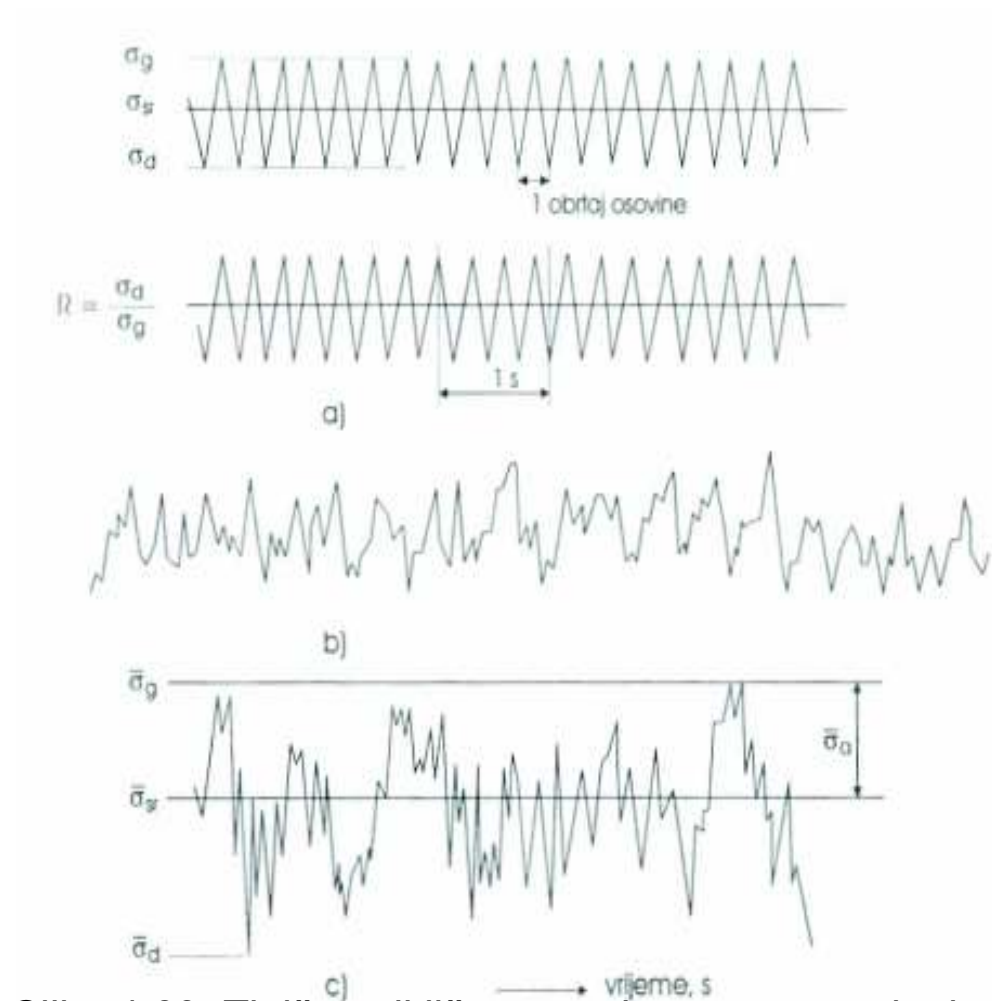
Slika 4.62: Promjenljiva naprezanja

U praksi karakteristične cikličke promjene naprezanja za

a) Kod osovina

a) Kod vratila

a) Kod krila
zrakoplova

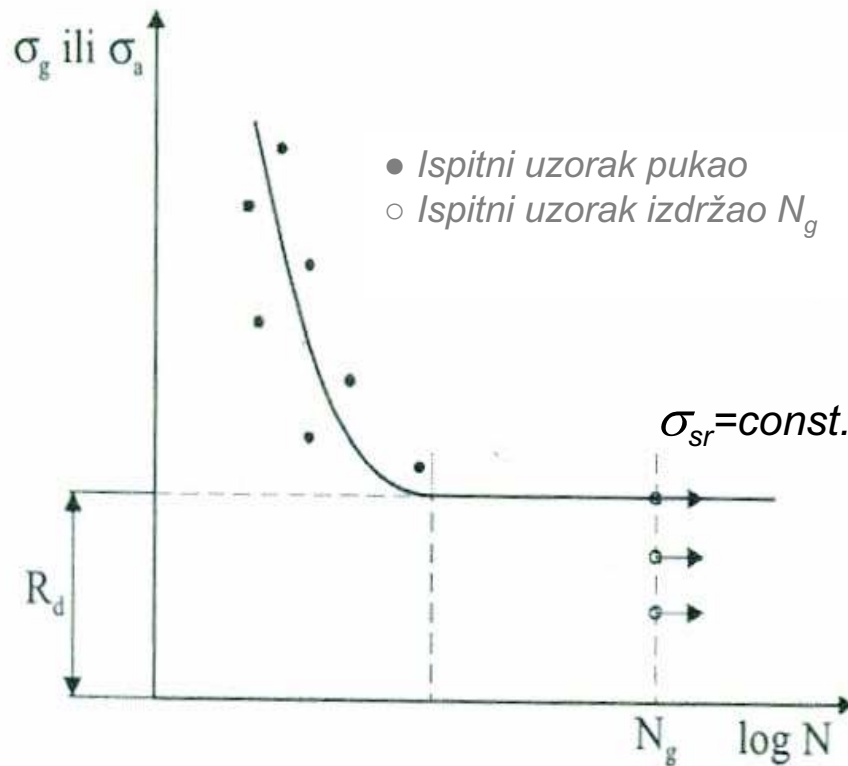


Slika 4.63: Tipične cikličke promjene naprezanja kod osovina, vratila i krila zrakoplova 216

4.2.2.2.2. *Wöhlerova krivulja*

- Za utvrđivanje dinamičke izdržljivosti izabere se jedan od tipova promjenljivog naprezanja, te se provodi tzv. Wöhlerov pokus s najmanje 5 razina naprezanja
- Za svaku razinu promjenljivog naprezanja, iskazani amplitudom naprezanja σ_a ili gornjim naprezanjem σ_g , ispituje se 6 do 10 istovrsnih ispitnih uzoraka.

Rezultati Wöhlerova pokusa ucrtavaju se u Wöhlerov dijagram, u koji se za pojedine vrijednosti dinamičkog naprezanja unose oni brojevi ciklusa koje su ispitni uzorci izdržali do loma, slika 4.64.

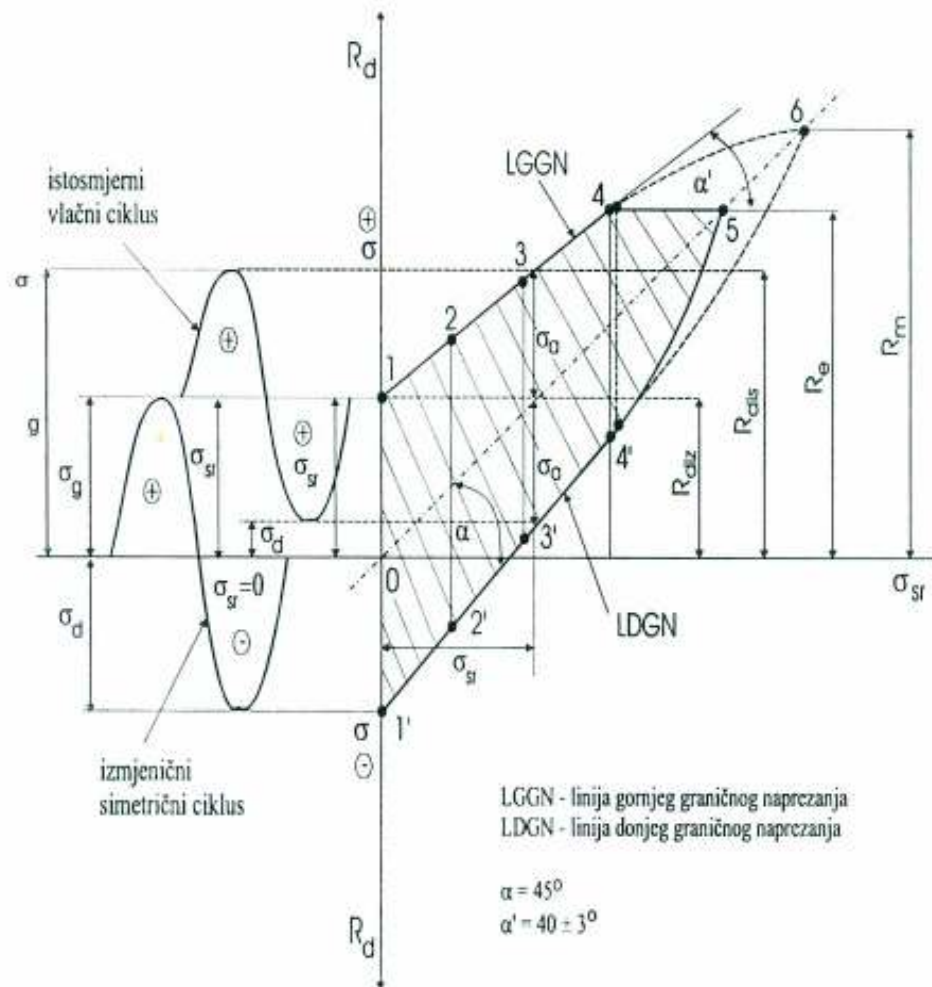


- Uobičajene vrijednosti graničnog broja ciklusa N_g za metalne materijale su :
 - Za čelik
 $N_g = 10^7$ titraja
 - Za bakar i bakrene legure
 $N_g = 5 \times 10^7$ titraja
 - Za lake metale i njihove legure
 $N_g = 10^8$ titraja

Slika 4.64: Wöhlerov dijagram

- Wöhlerov dijagram daje podatak o iznosu dinamičke izdržljivosti nekog materijala samo za jednu vrijednost srednjeg ili donjeg naprezanja, koje je konstantno tijekom pokusa. U praksi je potreban podatak i o dinamičkoj izdržljivosti za različite vrste promjenjivih naprezanja. Takve podatke daje Smithov dijagram (područje sigurnosti).

4.2.2.2.2. Smithov dijagram



- Smithov dijagram prikazuje podatke o dinamičkoj izdržljivosti nekog materijala za različita vlačno – tlačna promjenljiva naprezanja, naprezanja savijanjem ili uvijanjem.

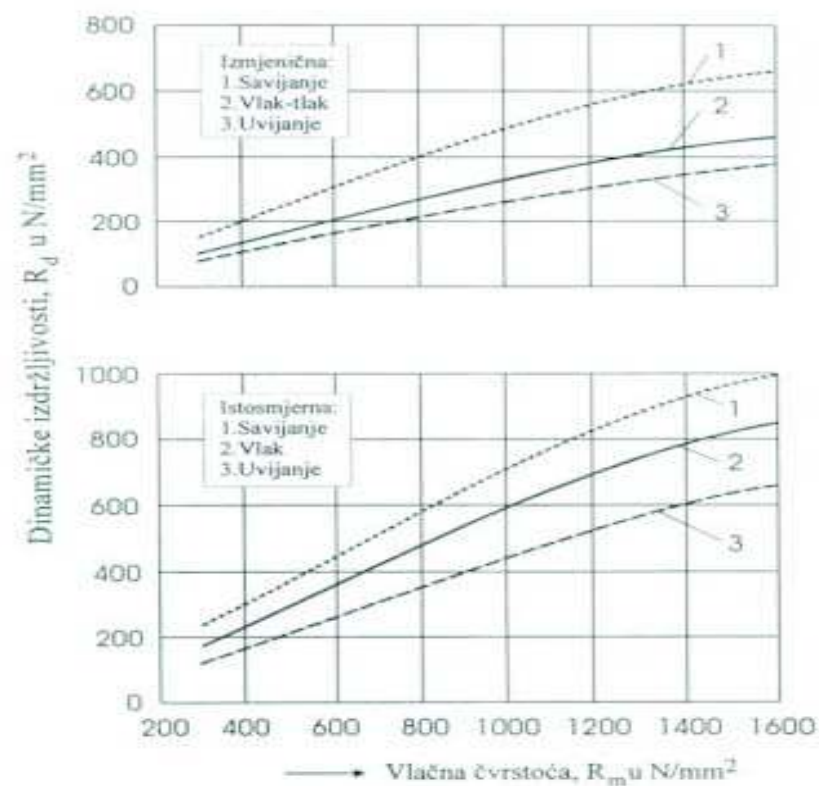
Slika 4.65: Smitov dijagram

- U Smithovom dijagramu je prikazana ovisnost dinamičke izdržljivosti R_d o srednjem naprezanju σ_{sr} . S gornje strane dijagrama područje dinamičke izdržljivosti ograničeno je linijom gornjih graničnih naprezanja te granicom razvlačenja R_e , a s donje strane linijom donjih graničnih naprezanja. Tako se povećanjem srednjeg naprezanja σ_{sr} dopuštena amplituda naprezanja σ_a jasno smanjuje. Za granični slučaj $\sigma_{sr} = R_e$ dopuštena amplituda jednaka je nuli.

Korelacija dinamičke izdržljivosti i vlačne čvrstoće

Tablica 4.3: Odnos dinamičke izdržljivosti i vlačne čvrstoće

R.br.	Korelacijska ovisnost	Autor
1.	$R_{sd} = 0,47 \cdot R_m \pm (10 \text{ do } 15)\%$	Lehr
2.	$R_{sd} = 0,285 \cdot (R_{sH} + R_{sd}) \pm (10 \text{ do } 20)\%$	Stribeck
3.	$R_{sd} = 0,25 \cdot (R_{sH} + R_m) + 50 \pm 21\%$	Mailänder
4.	$R_{sd} = 0,20 \cdot (R_{sH} + R_m + Z) \pm 12\%$	Jünger
5.	$R_{sd} = 0,17 \cdot (R_{sH} + R_m) + 150 \pm 10\%$	Stribeck
6.	$R_{sd} = 0,35 \cdot R_m + 122$	Žukov
7.	$R_{sd} = 0,287 \cdot R_m + 83 \pm 2\%$	Buch
8.	$R_{sd} = 0,30 \cdot R_{sH} + 105$	Schmidt
9.	$R_{sd} = 0,25 \cdot R_m \cdot (1 + 1,35 \cdot Z)$	Markšev, Žukov
10.	$R_{sd} = 0,65 \cdot R_{sH} \pm 30\%$	Mailänder
11.	$R_{sd} = 0,49 \cdot R_m \pm 20\%$	Mailänder
12.	$R_{sd} = 0,352 \cdot R_m + 91 \pm 5,5\%$	Buch
13.	$R_{sd} = 0,175 \cdot (R_{sH} + R_m - A_3 + 100)$	Leguis, Buchholz, Schulz
14.	$R_{sd} = 0,40 \cdot R_{sH} + 0,25 \cdot R_m$	Rogers
15.	$R_{sd} = (0,45 \text{ do } 0,55) \cdot R_m$ za polir. epruv. $\phi 7,5\text{mm}$	Hänchen
16.	$R_{sd} = 0,413 \cdot R_m + 53 \pm 12\%$	Kronmarck
17.	$R_d = 0,7 \cdot R_{sd} \pm 11\%$	Lehr
18.	$R_d = (0,30 \text{ do } 0,45) \cdot R_m = 0,90 \cdot R_{sd}$	Hänchen
19.	$R_{sd} = 0,575 \cdot R_{sd} = 0,285 \cdot R_m \pm 10\%$	Hempel
20.	$R_{sd} = 0,580 \cdot R_{sd} = (0,20 \text{ do } 0,35) \cdot R_m$	Hänchen



Slika 4.66: Ovisnost dinamičke izdržljivosti o vlačnoj čvrstoći

NORME

- HRN C.A4.035, Mehanička ispitivanja kovina.
Ispitivanje umaranjem. Opća načela.
- HRN C.A4.322, Ispitni uzorci za ispitivanje umaranjem
- DIN 50100, Ispitivanje dinamičke izdržljivosti
- DIN 50113, Ispitivanje dinamičke izdržljivosti
rotacijskim savijanjem
- DIN 50122, Ispitivanje dinamičke
izdržljivosti savijanjem na plosnatim
ispitnim uzorcima

5. MEHANIKA LOMA

Teorijske osnove mehanike loma razvijene su na temelju proučavanja iznenadnih i katastrofalnih lomova i oštećenja konstrukcija (npr. mostova, ratnih američkih brodova serije Liberty, pilotskih kabina zrakoplova, velikih spremnika za naftu, posuda pod tlakom, plinovoda, itd.)

Mehanika loma bavi se nastankom i napredovanjem pukotine u krutim tijelima.

Termin MEHANIKA LOMA ima dvostruki smisao:

- u užem smislu ona se odnosi na istraživanje uvjeta razvoja pukotine,
- u širem smislu mehanika loma obuhvaća i dio mehaničke otpornosti materijala koja se odnosi na završnu fazu deformacije materijala pod djelovanjem opterećenja.

Ovako postavljena mehanika loma povezuje teoretska razmatranja s rezultatima eksperimenata te analizira moguću pojavu loma i uzroke nakon havarija u eksploataciji.

5.1. VRSTE LOMOVA

- Lom se može definirati kao makroskopsko razdvajanje materijala koje dovodi do gubitka nosivosti čvrstog tijela.
- Fizikalni uzrok loma \Rightarrow djelovanje naprezanja koje razara atomsku ili molekularnu vezu te se na taj način formira nova slobodna ploština.
- Teoretsko naprezanje potrebno za stvaranje nove slobodne površine u kristalnoj strukturi utvrđuje se sljedećim izrazom

$$\sigma_{teo} = 2 \left(E \cdot \frac{\gamma}{d} \right)^{\frac{1}{2}} / MPa$$

E - modul elastičnosti,

γ - energija potrebna za stvaranje nove površine,

d - razmak kristalnih ravnina

Makroskopski i mikroskopski lom može biti žilav ili krhak.

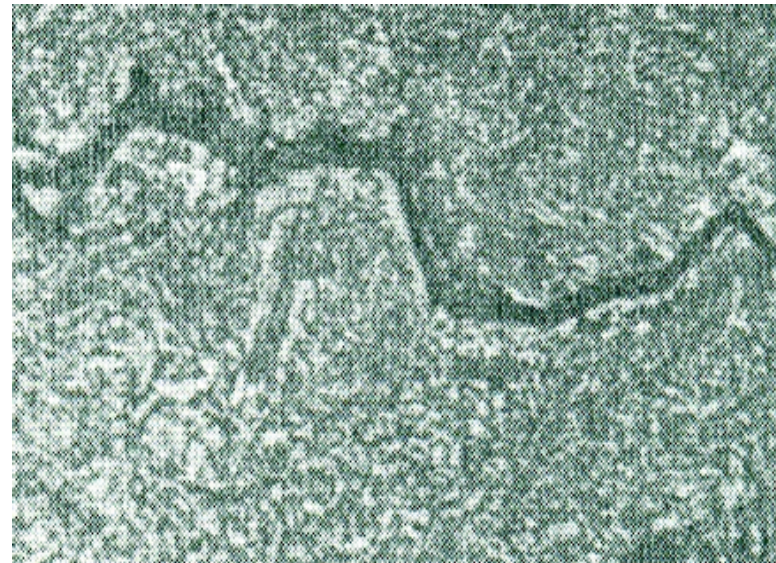
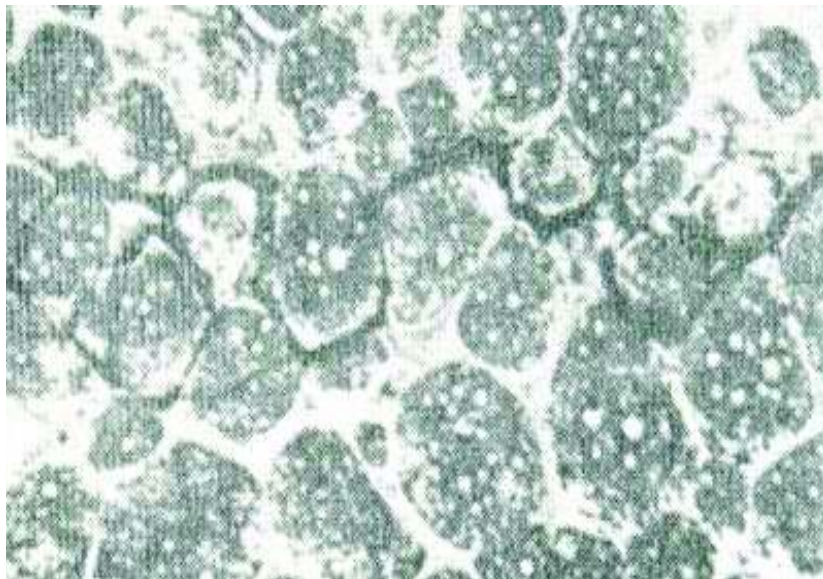
Kod makroskopski žilavog loma u blizini mjesta prijeloma prisutna je plastična deformacija, dok kod krhkog prijeloma ona izostaje. U mikrorazmjerima kod materijala sa kristalnom strukturom (svi metali, njihove legure, keramike, neki polimeri) lom može biti transkristalni i interkristalni. Interkristalni lom se širi kroz kristalno zrno, a može biti žilav i krhak.

Kod žilavog transkristalnog loma prisutne su, na prijelomnoj površini, udubine nastale plastičnom deformacijom metalne matrice oko čestica prisutnih u mikrostrukturi metalnih materijala.

Stoga se takav lom naziva jamičasti lom.

Krhki transkristalni lom slijedi određene kristalne ravni u pojedinim kristalnim zrnima. Kod materijala sa BCC rešetkom to su najčešće ravnine $\langle 100 \rangle$, a kod HPC rešetke ravnine $\langle 0001 \rangle$.

- Interkristalni lom napreduje uzduž granice zrna i uvijek je krhki lom. Po izgledu je sličan transkristalnom lomu, jer se prijelomna ploština sastoji od mikro glatkih ploha koje su u ovom slučaju granice kristalnih zrna.



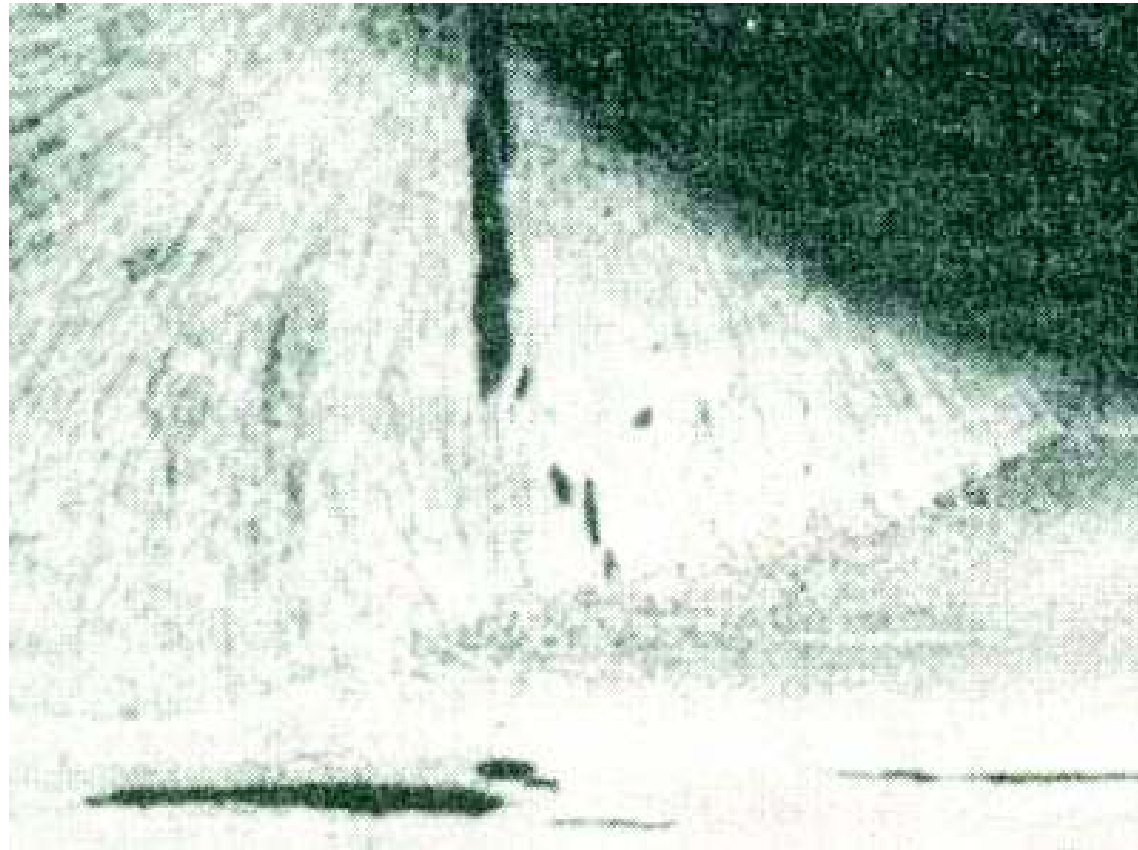
Slika 5.1: Interkristalni lom

U makro razmjerima lom od umora materijala uvijek je pretežno krhak, tj. bez plastične deformacije strojnog dijela u okolini prijelomne površine.



Slika 5.2: Lom od umora materijala

- Na slici su prikazane pukotine u varu i zoni utjecaja topline



- Slika 5.3: Pukotine u varu i zoni utjecaja topline

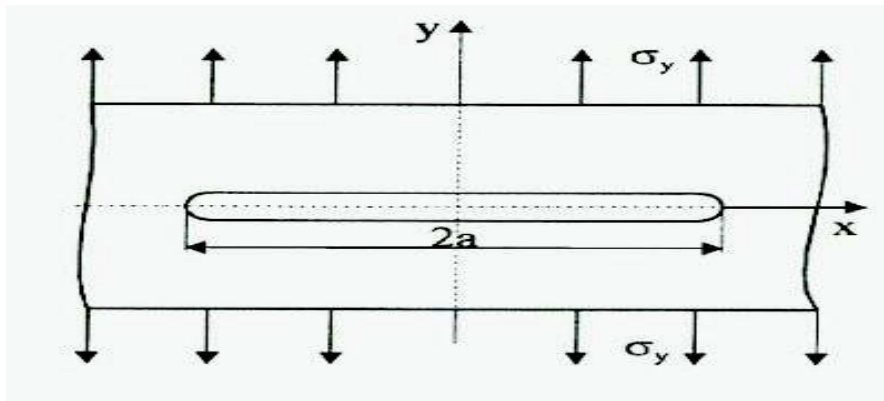
5.2. MODELI NASTAJANJA PUKOTINA

Najviše prihvaćeni modeli su:

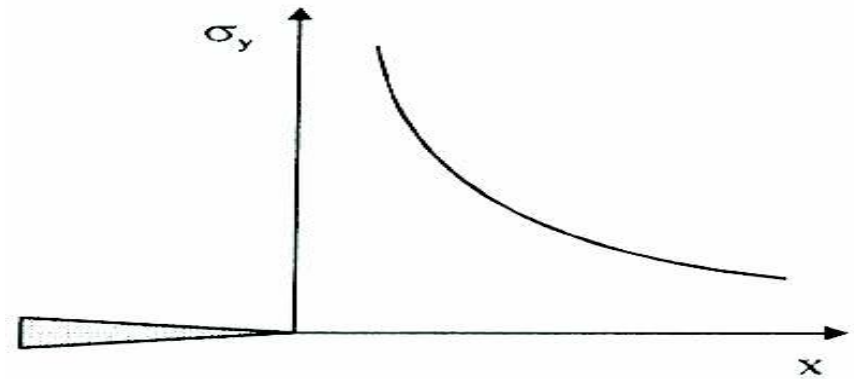
- Griffithov model pukotine
- Irwinov model pukotine
- model teorije dislokacija

5.2.1. Griffithov model pukotine

- A. Griffith postavio je kriterij za idealno krhki lom idealno krhkog materijala još 1920. Ova teorija temelji se na energetskej hipotezi loma. Polazi od pretpostavke da je lomna čvrstoća ograničena postojanjem početne pukotine u materijalu.



Slika 5.4: Griffithov model pukotine



Griffithov model je uska pukotina duljine $2a$ u vlačno napregnutoj ploči neograničene istezljivosti.

- Kriterij stabilnosti prema Griffithu je odnos oslobođene elastične distorzijske energije pri povećanju pukotine te energije potrebne za stvaranje nove površine. Kritično naprezanje za stvaranje pukotine je

$$\sigma_c = \left(2E \frac{\gamma_0}{\pi} a \right)^{\frac{1}{2}} / MPa$$

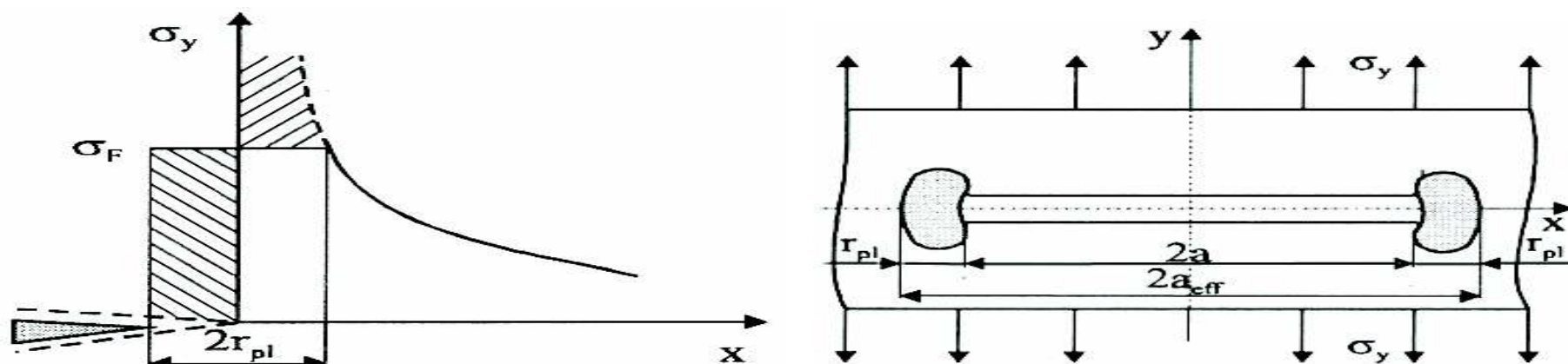
- Odnosno kritična duljina pukotine je

$$a_c = 2E \frac{\gamma_0}{\pi} \sigma^2$$

- Eksperimentalna istraživanja potvrdila su mogućnost korištenja navedenih izraza samo za iznimno krhke materijale (staklo, keramika), dok je za žilavije materijale primjena ograničena.

5.2.2. Irwinov model pukotine

Irwin je učinio poboljšanje Griffithovog modela pukotine. Njegova teorija temelji se na pretpostavci postojanja plastične zone pri vrhu pukotine, odnosno fiktivnog produljenja pukotine za polumjer plastične zone.



Slika 5.5: Irwinov model pukotine

Prema ovom modelu, u korijenu pukotine naprezanje je jednako granici razvlačenja R_e te ne postoji matematički singularitet, odnosno neizmjereno veliko naprezanje u korijenu pukotine što je bio osnovni nedostatak Griffithova modela.

5.2.3. Model teorije dislokacija

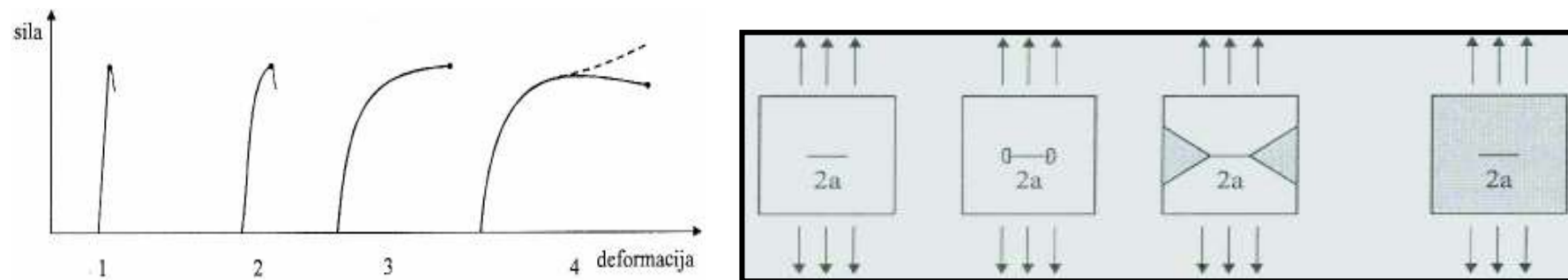
Teorija dislokacija je razvijena je između 1930 i 1950. i omogućila je bolje razumijevanje procesa loma.

Utvrđeno je da krhki lom pomažu :

- koncentracija naprezanja oko zareza, pukotina, i sl.
- velike brzine opterećenja
- uporaba konstrukcija na temperaturama nižim od temperatura nulte duktilnosti
- uvjeti deformacije u konstrukcijskim elementima
- područje grube i promijenjene strukture kod zavarivanja itd.

5.3. KRITERIJA LOMA

Na osnovi različitog ponašanja materijala 1954. Irwin je predložio definicije kriterija loma strojnih dijelova odnosno ispitnih uzoraka koje sadrže pukotine.



Slika 5.6: Stadiji deformacije krutog tijela s pukotinom

1. linearno-elastična deformacija;
2. stvaranje ograničene plastične zone;
3. elastično-plastična deformacija;
4. svekoliko tečenje

- Proširenje elastično-plastične mehanike loma u četvrto područje imalo bi smisla samo u slučaju pojave loma kao posljedice proširenja pukotine, a ne plastične nestabilnosti tijela.
- Kad lokalno naprezanje postane veće od granice razvlačenja, dolazi do stvaranja i širenja pukotine. Sila razvoja pukotine G (G u čast Griffithu) po jedinici rasta pukotine u neposrednoj je vezi s faktorom intenzivnosti naprezanja prema jednadžbama:

- $G = \frac{K^2}{E} (1 - \mu^2)$ za ravninsku deformaciju

- $G = \frac{K^2}{E}$ za ravninsko naprezanje

- Gdje je K – faktor intenzivnosti naprezanja
 E - modul elastičnosti
 μ - Poissonov koeficijent

$$K = \sigma_N (\pi a)^2 f \quad \text{N/mm}^{3/2}$$

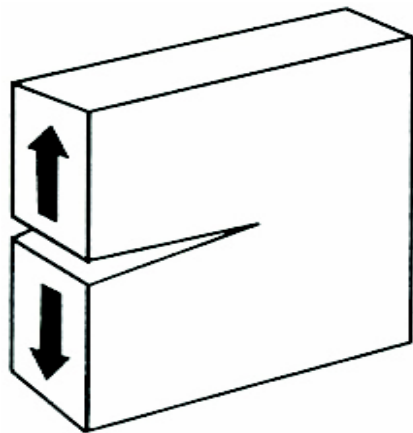
Faktor intenz.
naprez.

nazivno
naprez.

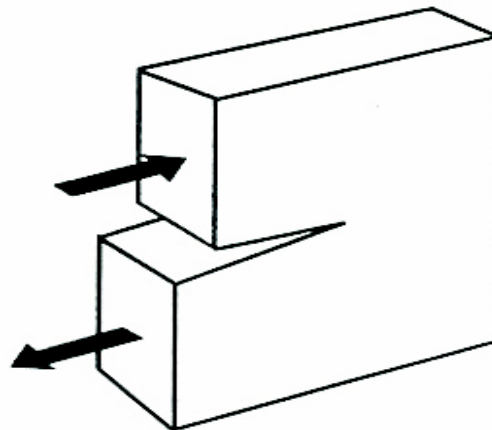
debljina
pukotine

korekturni
koeficijent (geometrija)

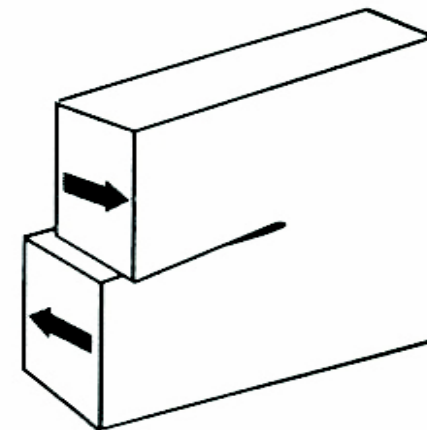
Ovisno o vrsti naprezanja razlikuju se tri načina otvaranja pukotine:



I način



II način



III način

Slika 5.7: Načini otvaranja pukotine pri lomu

I način - jednostavno otvaranje
pukotine

II način – uzdužno smicanje

III način - poprečno smicanje

I način

- jednostavno otvaranje pukotine je najčešći u praksi. Odvija se na način da se površine loma udaljavaju jedna od druge. Susreće se kod strojnih dijelova s vanjskim i unutarnjim pukotinama, opterećenih vlačnim opterećenjem i na savijanje, te kod konstrukcija podvrgnutim unutrašnjim tlakovima.

II i III način

- Uzdužno i poprečno smicanje, otvaranje pukotine odvija se na način da površine loma klize jedna po drugoj.

- Između ovih načina vrijedi odnos

$$K_{IC} \triangleleft K_{II} \triangleleft K_{III}$$

- Poznavanje vrijednosti K_{IC} dovoljno je za utvrđivanje granice sigurnosti od loma neke konstrukcije ili strojnog djela kod proračuna.
- Drugi parametar loma koji se koristi za opis otvaranja pukotine kod veće plastične deformacije na vrhu pukotine je J-integral po Riceu (*otpornost prema lomu*).

5.4. CILJEVI MEHANIKE LOMA

Kod razmatranja mehanike loma mora se imati na umu:

- ispitivanje do loma provodimo u cilju ispitivanja svojstava materijala (granica razvlačenja, čvrstoća, žilavost, dinamička izdržljivost, otpornost prema puzanju itd.)
- Ispitivanje pojave pukotine tijekom eksploatacije (određivanje preostalog vijeka trajanja strojnog dijela ili konstrukcije). Veličina pukotine određuje se nerazornim metodama.

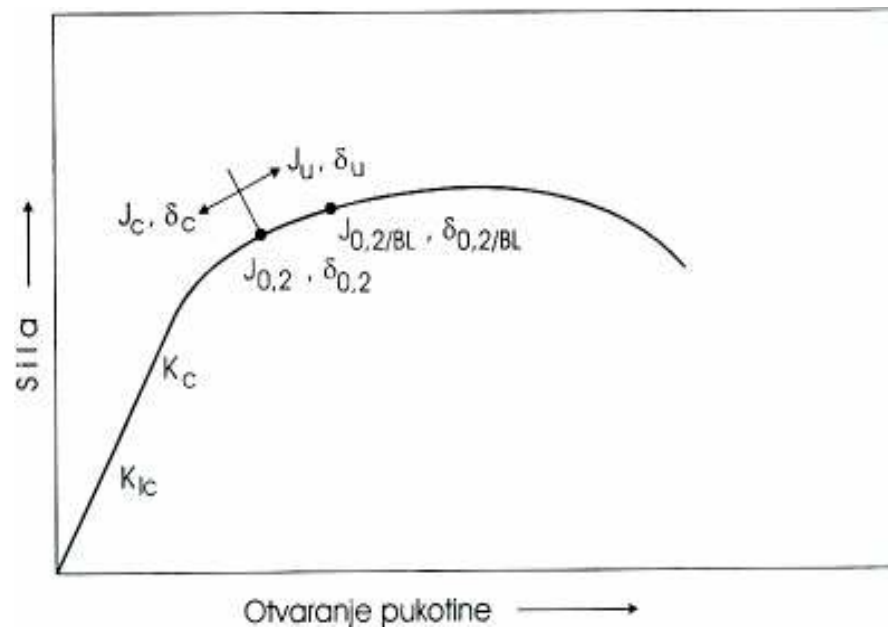
Temeljne ciljeve mehanike loma najbolje je rezimirao Blumenauer u "trokutu povezanih ovisnosti " :

- parametara mehanike loma koje se određuje pri mehaničkom ispitivanju materijala
- veličine, položaja i oblika grešaka koje se određuju nerazornim ispitivanjem materijala (ultrazvuk, magnetska ispitivanja, ispitivanje x i γ zrakama)
- analize naprezanja proučavanjem parametara oko vrha pukotine u materijalu

Pomoću ove tri ovisnosti moguće je definirati ciljeve mehanike loma kako slijedi:

- sigurnost od loma
- preostali vijek konstrukcije s pukotinom ili greškom
- razvoj i optimizacija materijala
- osiguranje kvalitete
- tehnička dijagnostika
- analiza različitih slučajeva složenih oštećenja konstrukcija.

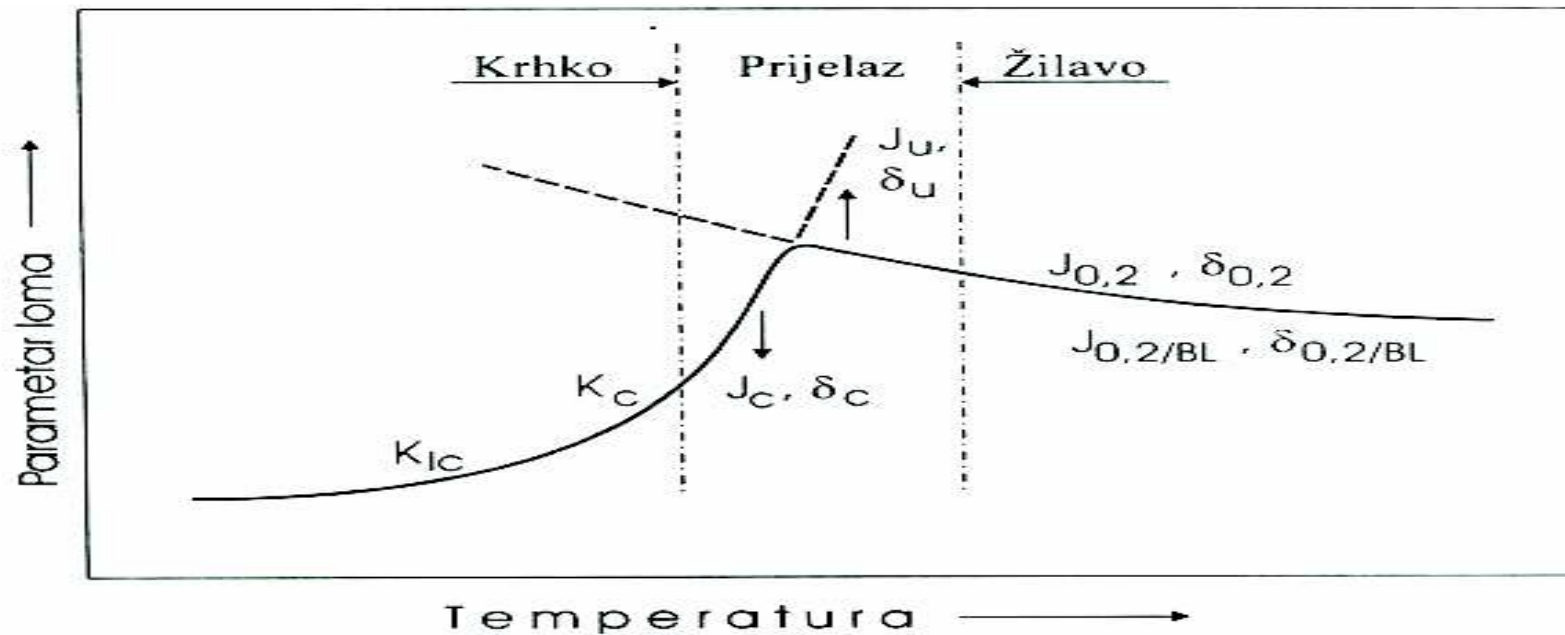
- Na slici 5.8. je pregledno dan prikaz područja određivanja najvažnijih parametara mehanike loma na dijagramu.



- Slika 5.8: Dijagram sila- otvaranje pukotine s najvažnijim parametrima mehanike loma.

Utjecaj temperature na područje eksploatacije strojnog dijela ili konstrukcije .

- Kad se govori o temperaturi, govori se o temperaturnom području krhkog, prijelaznog i žilavog loma. *Ovisnost najvažnijih parametara loma od temperature ispitivanja kod feritnih čelika dana je na slici 5.9.*



Slika 5. 9: Ovisnost parametara loma o temperaturi

TVRDOĆA - svojstvo materijala

Tvrdoća je fizikalno svojstvo materijala, odnosno otpor kojim se suprotstavlja neko tijelo ka prodiranju drugog tvrdog tijela u njegovu površinu.

- ***Razlika*** između ispitivanja tvrdoće i drugih, do sad opisanih, metoda ispitivanja:
- vanjski mehanički utjecaj na mali dio površine
- naprezanja na mjestu ispitivanja u površinskom sloju metala su složena

Mohs-ova skala

- prva metoda za mjerenje tvrdoće je zaparavanjem površine mineralima
- Mohsova skala tvrdoće je klasifikacija tvrdoće zaparavanjem 10 relativno čistih minerala
- prema Mohsovoj skali tvrdoće minerala svrstane su u deset razreda
- Svaki razred mora zaparati površinu prethodnog razreda.

Prema ovoj skali metalni materijali imaju sljedeće tvrdoće:

- Kositar	1 ½	- Platina	4 ½
- Olovo	1 ½	- Iridij	6
- Aluminij	2	- Platina-iridij	6 ½
- Zlato	2 ½	- Meki čelik	5
- Srebro	2 ½	- Tvrđi čelik	6 ½
- Željezo	4 ½	- Tvrđi metal	
		(vidija)	9.8

Mohs-ova skala

Talk
Gips
Kalcit
Fluorit
Apatit
Feldšpat
Kvarc
Topaz
Korund
Dijamant

6.1. UTJECAJNI PARAMETRI NA TVRDOĆU

- kemijski sastav
- struktura
- prethodna tehnologija preradbe
 - mehanička obradba (temperatura, stupanj deformacije, brzina hlađenja...)
 - toplinska obradba (temperatura, brzina hlađenja,...)

6.2. ISPITIVANJE TVRDOĆE

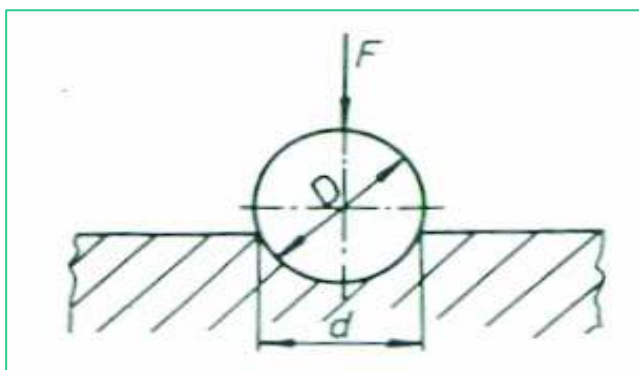
- Tvrdoća se ispituje prema različitim djelovanjima sile i zato se iskazuje u različitim veličinama:
 1. **mjerenje otpora prodiranja** (ili dubine prodiranja) u površinu metala koja je preko tvrdog tijela u većoj mjeri plastično deformirana
 2. **mjerenje površinskih razaranja** nastalih djelovanjem tvrdih tijela (metode zaparavanja) pri čemu naprezanja nastala ovim djelovanjem prelaze mjestimično čvrstoću materijala
 3. **mjerenjem elastičnih svojstava površine metala** ispitivanjem elastičnog sudara tvrdog tijela sa površinom metala (metoda odskakanja)

6.3. METODE ZA ISPITIVANJE TVRDOĆE:

- Ispitivanje tvrdoće metodama penetracije
 - a) *Brinellova metoda*
 - b) *Rockwellova metoda*
 - c) *Vickersova metoda*
 - d) *mikrotvrdoća*
- Ispitivanje tvrdoće dinamičkim metodama
 - a) *postupak s konstantnom energijom udara*
 - b) *Poldijev postupak s čekićem*
- Ispitivanje tvrdoće metodama elastičnog odskoka
 - a) *skleroskopska metoda po Shoreu*
 - b) *metoda Pajc*
- Ispitivanje tvrdoće metodama zaparavanja
 - c) *Martensov postupak*
 - d) *diriteskop*

6.3.1. Ispitivanje tvrdoće po Brinellu

- Tvrdoća po Brinellu je otpor što ga materijal pruža prodiranju zakaljene čelične kuglice promjera D tlačene silom F .



$$HB = \frac{0,102 F}{S}$$

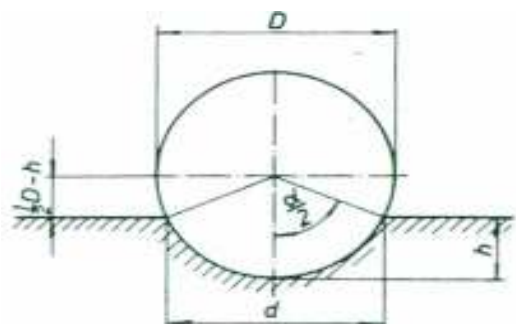
gdje je:

F – sila, N

S – ploština kuglične kalote, mm²

Slika 6.1: ispitivanje tvrdoće po Brinellu

- U ispitivanom materijalu nastaje otisak u obliku kuglične kalote promjera baze d i dubine h .



$$S = \pi Dh$$

D – promjer kuglice, mm

h – dubina prodiranja kuglice nakon rasterećenja, mm

255

Slika 6.2: otisak kuglice

ploština kalote je:

$$S = \pi D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)$$

Tvrdoća po Brinellu je:

$$HB = \frac{0,204F}{\pi D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)}$$

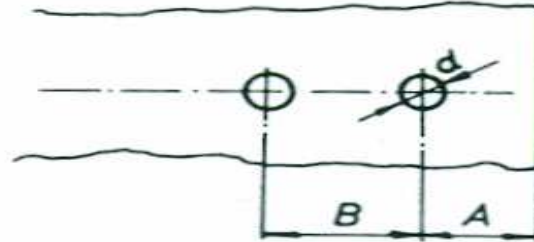
- Normirani promjeri kuglice D su: 10; 5; 2,5; 2 i 1mm.
- Mjerenje je valjano ako promjer kalote iznosi 0,25 do 0,5 promjera kuglice-
- Sila utiskivanja određuje se iz stupnja opterećenja X :

$$X = \frac{F}{D^2} \cdot 0,1020$$

- Trajanje utiskivanja kuglice kreće se 10 do 15 s (za Fe – C legure), a do 180 s za najmekše metale (olovo itd.).

Uvjeti koje treba ispuniti prije ispitivanja:

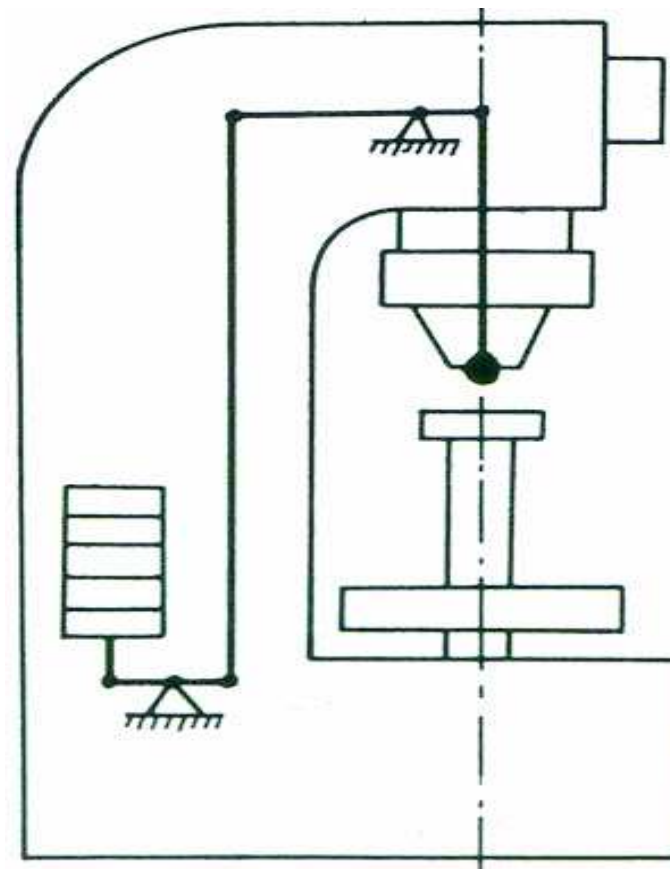
- debljina uzorka mora biti $s \geq 8h$
- djelovanje sile mora biti okomito na površinu uzorka
- otisak mora biti udaljen od ruba uzorka prema slici



Materijal	A	B
Čelik, sivi liv, bakar	$2,5d$	$4d$
Aluminijum	$3d$	$6d$
Olovo	$2,5d$	$6d$

Slika 6.3: Udaljenost otiska od ruba uzorka

- Tijek ispitivanja:
 - a) utiskivanje mora početi bez sudara, postepeno.
 - b) puno opterećenje postigne se nakon 15 s.
 - c) uzorak ostaje pod opterećenjem 15,30 ili 60 s.
 - d) tada se tek provodi mjerenje otiska.



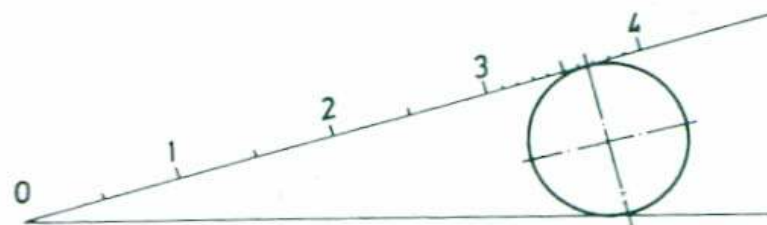
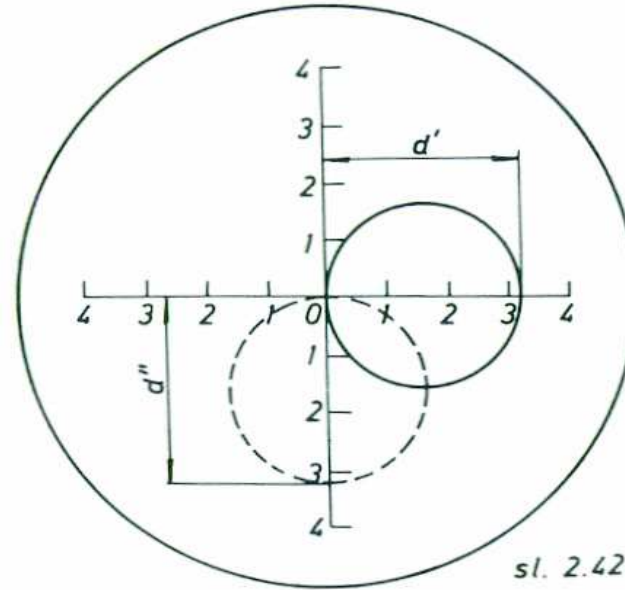
Slika 6.4: Shema tvrdomjera

- Trajanje ispitivanja ovisi o samoj tvrdoći. Što je materijal mekši, ispitivanje će trajati duže. Na taj način daje se prilika očvršćivanju materijala uslijed deformacije, a koje bi trebalo zaustaviti prodiranje kuglice.

Mjerenje otiska

Mjerenje otiska provodi se:

- povećalom
s mikrometrom
- ravnalom



Slika 6.5: Mjerenje otiska kuglice

Pravilan i nepravilan otisak

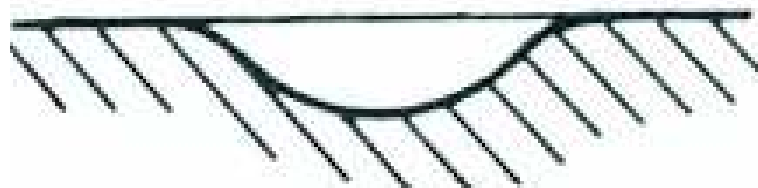
a) pravilan otisak



b) nepravilan otisak nastao
uslijed veće sile
utiskivanja



c) nepravilan otisak kod vrlo
tvrdih materijala



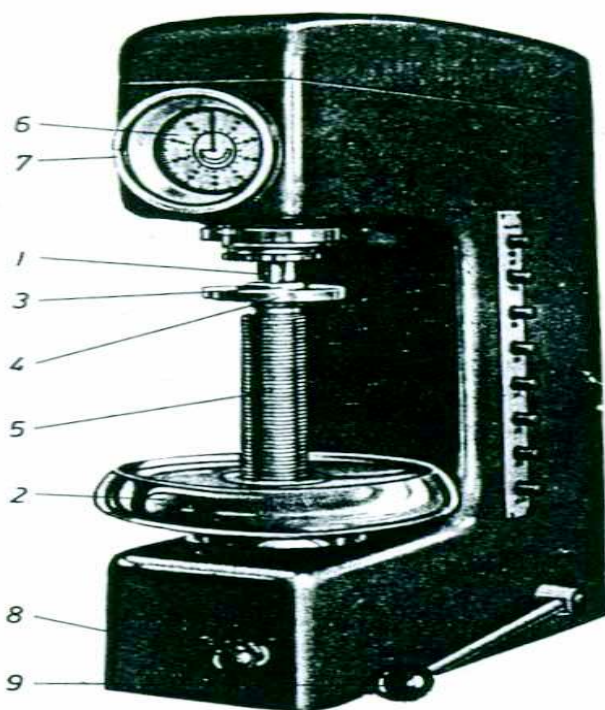
Slika 6.6: Pravilan i nepravilan otisak kuglice

- ***Kada se ispituje tvrdoća po Brinellu?***
- Primjenjuje se za sve metalne konstrukcijske materijale čija tvrdoća ne prelazi $450HB$, ako se ispituje sa zakaljenom čeličnom kuglicom (HBS), odnosno do $650HB$ ako se koristi kuglica od tvrdog materijala (HBW). Tvrdoća kuglice je oko $650HV$.
- Tvrdoća po Brinellu je značajna veličina za utvrđivanje tvrdoće nekog materijala i ima posebno značenje kao usporedna veličina. Omogućava usporedbu svojstava različitih materijala i njihovih stanja, i ima veliko značenje pri kontroli.
- Na temelju tvrdoće može se zaključiti o strukturi ispitivanog uzorka, odnosno o prethodno provedenoj toplinskoj obradbi, te uzrocima nastanka lomova itd.

6.3.2. Ispitivanje tvrdoće po *ROCKWELLU*

- Mjera tvrdoće po Rockwellovoj metodi, za razliku od metoda Brinella i Vickersa, je dubina otiska.
- Metoda je vrlo jednostavna i zato je dosta rasprostranjena.
- Mogu se mjeriti vrlo visoke i niske tvrdoće. Vrijednosti se očitavaju na skali tvrdomjera.
- Penetratori su dijamantni stožac ili kuglica od kaljenog čelika.

Mjerenje se provodi na tvrdomjeru.

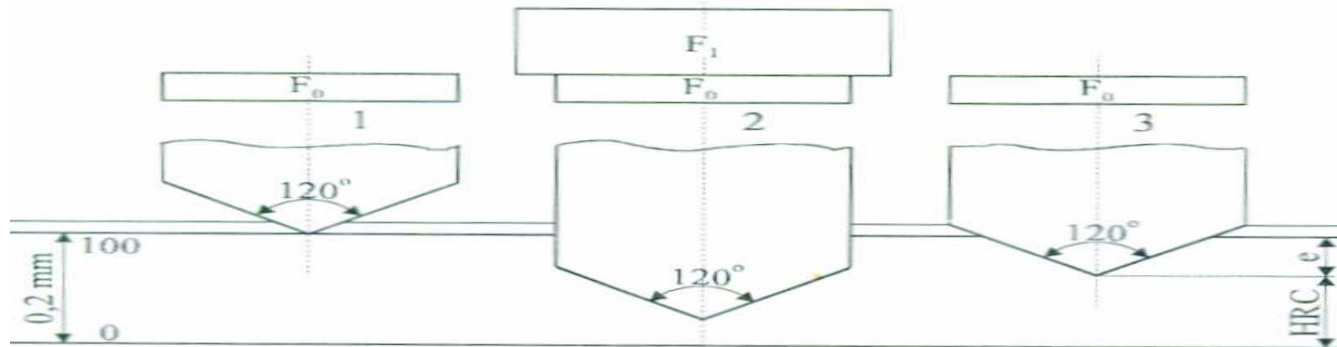


- 1 - nosač utiskivača
- 2 - kotač
- 3 – uzorak
- 4 - postolja za uzorak
- 5 – zavojno vreteno
- 6 – skala za očitavanje tvrdoće
- 7 – prsten za podešavanje
- 8 – ručica za oslobađanje poluge
- 9 – ručica za rasterećenje

Slika 6.7: Rockwelov tvrdomjer

Razlikuju se dva tipa postupka:

- normalna makrotvrdoća po Rockwellu sa ukupnim približnim opterećenjem od 600, 1000 i 1500 N (skala A, B i C)
- z mjerenje tvrdoće površinskih slojeva sa ukupnom približnom silom utiskivanja 150, 300 i 450 N (skala N i T)



Slika 6.8: Mjerenje tvrdoće po HRC metodi

- Postupak pri ispitivanju sastoji se od tri faze:
- nanošenje predopterećenja - ima za cilj otklanjanje utjecaja neravnina na površini ispitivanog predmeta do dubine h_1
- nanošenje glavnog opterećenja -nanosi se ukupno opterećenje na utiskivač pri čemu on prodire do dubine h_2 koja u sebi sadrži izazvane plastične i elastične deformacije, odnosno $h_2 = h_p + h_e$
- rasterećenje koje se provodi tako da se opterećenje na utiskivaču smanji na predopterećenje pri čemu nestaju elastične deformacije, kako ispitivanog materijala tako i uređaja za ispitivanje.
- Dubina utiskivanja se smanji na dubinu h_3 .

- Mjerilo tvrdoće je dubina utiskivanja svedena na Rockwellove jedinice, pri čemu dubina od 0,002mm odgovara jednoj Rockwellovoj jedinici, prema izrazu:

$$e = \frac{h_3 - h_1}{0,002}$$

Da bi brojna vrijednost mekšeg materijala imala manju, odnosno tvrdog materijala veću vrijednost, uvode se u izraze za tvrdoću konstante

$$HRB = 130 - \frac{h_3 - h_1}{0,002} \quad HRB = 100 - e$$

- Metoda *HRB* za ispitivanje mekih materijala ima skalu od 130 jedinica, a pri ispitivanju se preporučuje područje 25 – 100 *HRB*
- Metoda *HRC*, za ispitivanje tvrdih materijala ima skalu od 100 jedinica, a pri ispitivanju se preporučuje područje 20 – 67 *HRC*

Tablica 6.1 : Ispitivanje tvrdoće Rockwellovom metodom

Skala	C	A	B	F
Oblik penetratora	Stožac s vršnim kutom 120°	Stožac s vršnim kutom 120°	Kuglica promjera 1,5875 mm	Kuglica promjera 1,5875 mm
Materijal penetratora	dijamant	dijamant	Kaljeni čelik	Valjani čelik
F ₀ , N	98	98	98	98
F ₁ , N	1471	588	980	490
Maks dubina prodiranja	0,200	0,200	0,200	0,200
Oznaka tvrdoće	HRC	HRA	HRB	HRF
Utvrđivanje tvrdoće	100-e	100-e	130-e	130-e
Područje mjerenja	20-70 HRC	20-88 HRA	20 - 100 HRB	60-100 HRF
Primjena metode	Toplinski obrađeni čelici	tvrdi metali	Normalizirani čelici, Cu legure	Hladno valjani čelični limovi i Cu legure

- Osnovna prednost Rockwellove metode, u odnosu na Brinellovu i Vickersovu metodu, je u brzini mjerenja.
- Iznos tvrdoće očitava se neposredno na skali tvrdomjera.
- Nedostatak metode je manja preciznost mjerenja i slabija selektivnost metode.

6.3.3. Ispitivanje tvrdoće po VICKERSU

- Mjerilo tvrdoće po Vickersu je odnos sile ispitivanja i površine otiska dijamantne četverostrane piramide s kutom od 136° i kvadratnom osnovom na površini ispitivanog uzorka.

$$HV = \frac{0,102 \times F}{S}$$

$$S = \frac{d^2}{2 \cos 22^\circ} = \frac{d^2}{1,854}$$

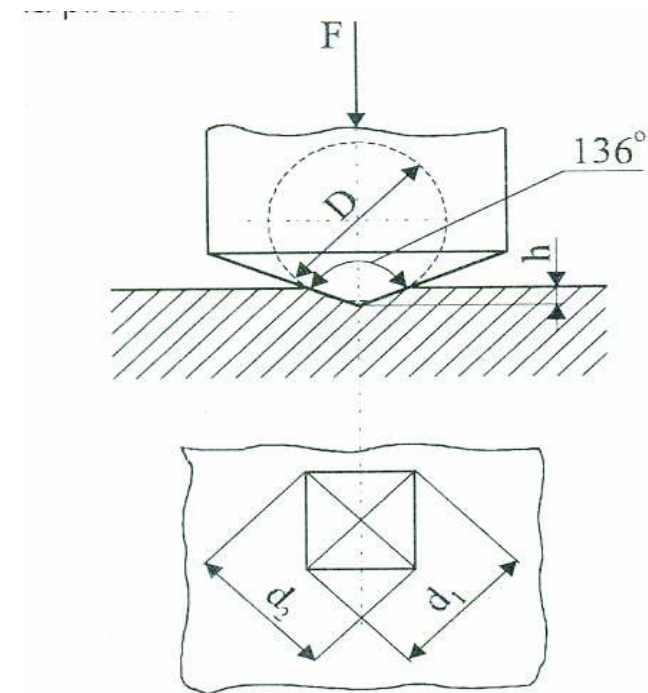
$$HV = \frac{F \times 0,1891}{d^2}$$

Gdje je:

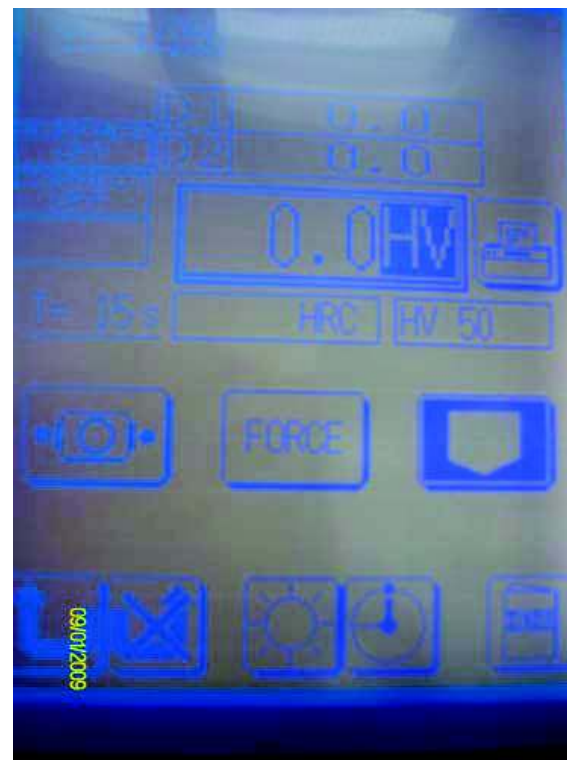
F - sila utiskivanja, N

S - ploština otiska nakon rasterećenja, mm²

d - srednja vrijednost od dvije izmjerene dijagonale otiska, mm



Slika 6.9: Mjerenje tvrdoće po Vickersu



Slika 6.10: Vickersov tvrdomjer

■ Prema navedenim izrazima tvrdoća po Vickersu približno jednaka je istoj po Brinellu (<8 do 300HB).

Kod Vickersove metode otklonjena su dva osnovna nedostatka Brinellove metode:

- ograničenost područja mjerenja do 450HB (odnosno do 650HBW)
- ovisnost iznosa tvrdoće o primijenjenoj sili utiskivanja kuglice.

- Prvi nedostatak uklonjen je uporabom najtvrdjeg materijala za penetrator, četverostrane piramide s kutom od 136° između stranica. Taj kut nije slučajno izabran. Zatvaraju ga tangencijalne ravnine na Brinellovu kuglicu pri optimalnoj veličini otiska, $d=0,375xD$
- Prema sili utiskivanja razlikuju se tri postupka Vickersove metode :
- uobičajene vrijednosti Vickersove tvrdoće sa silom utiskivanja od o 49 do 980 N
- srednje mikrotvrdoće sa silom utiskivanja od 1,96 do 49 N (provodi se pri ispitivanju tankih uzoraka)
- mikrotvrdoće sa silom utiskivanja do 1,96 N. (provodi se kod mjerenja strukturnih faza, npr. kristalnih zrna obično s 0,1N – HV0,1)

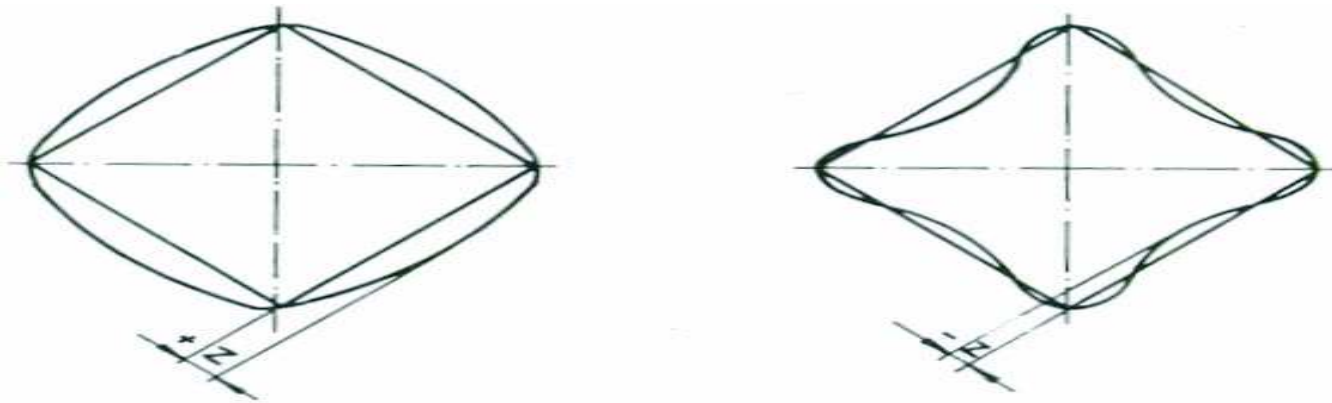
Tijek mjerenja:

- priprema uzorka
- postavljanje uzorka u tvrdomjer
- postizanje potrebnog opterećenja
- vrijeme trajanja opterećenja (10-15 s)
- rasterećenje
- mjerenje otiska (dvije dijagonale)
- izračunavanje tvrdoće

Kod ispitivanja tvrdoće moraju se ispuniti sljedeći uvjeti:

- minimalna debljina uzorka mnogo je manja nego kod Brinella jer se primjenjuju niža opterećenja i u pravilu iznosi $(1,2 - 1,5)d$ (d je dijagonala otiska)
- razmak od osi otiska do ruba uzorka ili drugog otiska ne smije biti manji od 2,5 vrijednosti dijagonale otiska.
- penetrator mora biti okomit na površinu uzorka
- ploština uzorka mora biti brušena i polirana

U slučaju nepravilnog oblika



Slika 6.11.: Nepravilan otisak
potrebno je provesti korekciju tvrdoće prema izrazu

$$HV = 1,854x \frac{Fx0,188}{2 \left(\frac{d}{\sqrt{2}} \pm z^2 \right)}$$

gdje je z veličina odstupanja od pravilnog oblika

- Tvrdoća po Vickersu je bezdimenzionalna veličina
- označava se slovnim simbolom *HV* uz naznaku uvjeta ispitivanja
- npr. izračunata tvrdoća od 430 jedinica sa silom opterećenja od $10 \times 9,81$ N u vremenu trajanja ispitivanja od 10-15 sekundi odgovara oznaci

430HV10

Tablica 6.2: Usporedba tvrdoće izmjerene različitim metodama

<i>HV</i> <i>F=49N</i>	<i>HB</i> <i>F=0,102/D²=30</i>	<i>HRB</i>	<i>HRC</i>	<i>Rm,</i> <i>MPa</i>
100	95	56,2		343
150	143	78,7		500
200	190	91,5		667
230	219-228	96,7	19,2	765
240	238	98,1	23,0	834
300	285	99,5	30,3	1010
350	333		36,0	1177
400	380		40,7	1353
450	428		44,8	
500	(475)		48,3	

Tablica 6.2: Usporedba tvrdoće izmjerene različitim metodama (DIN 50150/1976)

HV F=49/N	HB ($0,102F/D^2$ =30)	HRB	HRC	Rm/MPa
100	95	56,2		320
150	143	78,7		480
200	190	91,5		640
230	219	96,7		740
240	228	98,1	20,3	770
250	238	99,5	22,2	800
300	2853		29,8	965
350	333		35,5	1125
400	380		40,8	1290
450	428		45,3	1455
500	475		49,1	1630

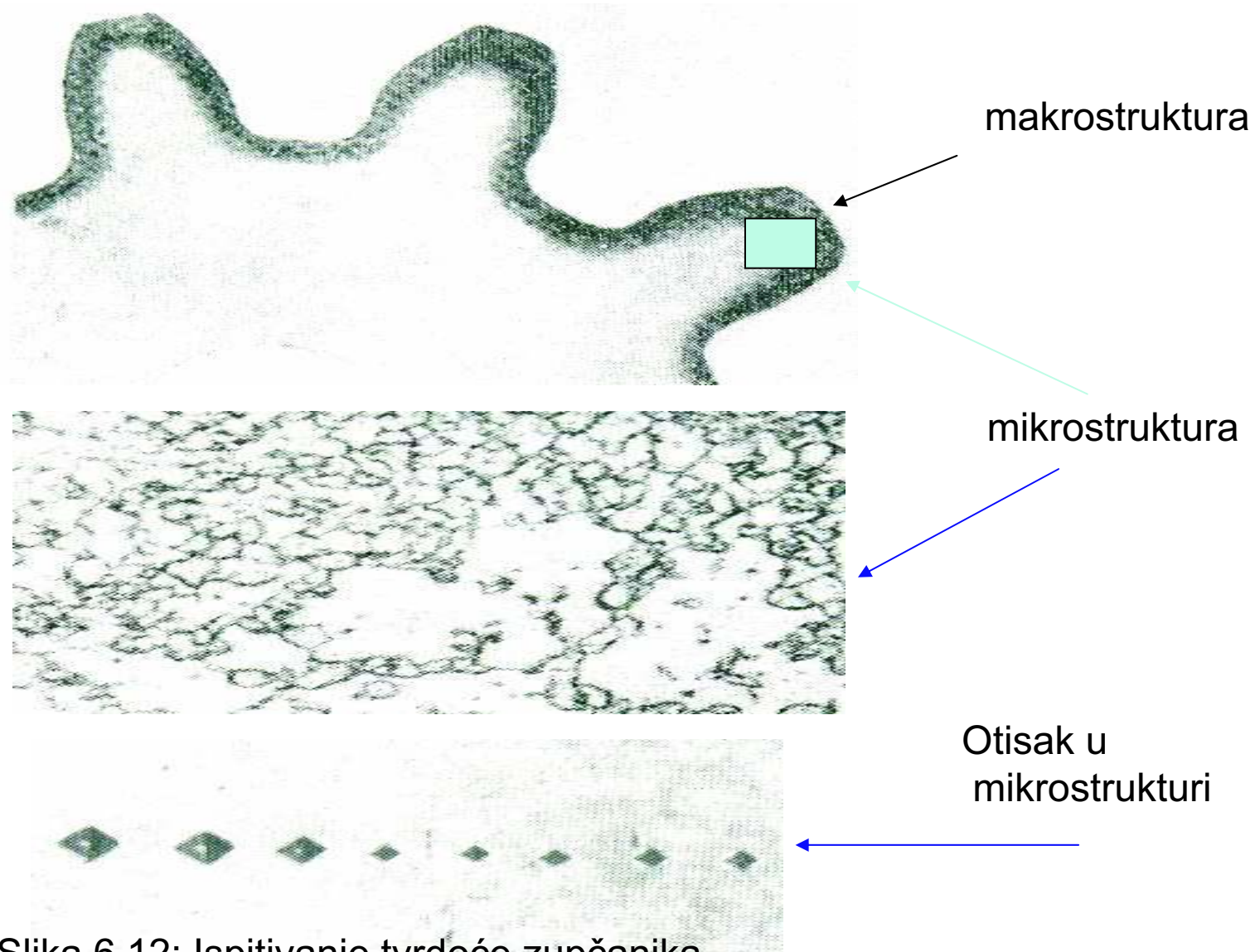
6.4. MIKROTVRDOĆA

- Ispitivanje mikrotvrdoće koristi se kod ispitivanja vrlo tankih ili malih dijelova.
- Sile utiskivanja su vrlo male, 0,01-2 N.
- Pri ispitivanju mikrotvrdoće mogu se ispitivati vrlo tanki i mali dijelovi ili se pri metalografskim ispitivanjima određuje tvrdoća mikrokonstituenata ili uključaka, odnosno površinskih deformiranih i napregnutih slojeva.
- Pri ispitivanju mikrotvrdoće, ovisno o obliku utiskivača razlikuju se metode:
 - a) po Vickersu
 - b) po Knoopu
 - c) po Grodzinskom

6.4.1. Mikrotvrdoća po Vickersu

- Principijelne razlike između tvrdoće po Vickersu i mikrotvrdoće po Vickersu nema, ali je daleko veća točnost izradbe dijamantnog penetratora kod mikrotvrdoće, jer su otisci vrlo mali.
- Mjerenje otiska provodi se na mikroskopu
- ploština na kojoj se izvodi ispitivanje mikrotvrdoće se mora pripremiti kao za metalografsko ispitivanje
- Ispitivanje mikrotvrdoće je vrlo precizna i osjetljiva metoda koja zahtijeva vrlo kvalificiranog i uvježbanog ispitivača. Greške koje nastanu pri ispitivanju mogu izazvati velika odstupanja između pojedinih ispitivanja i dati pogrešnu sliku o ispitivanom dijelu.

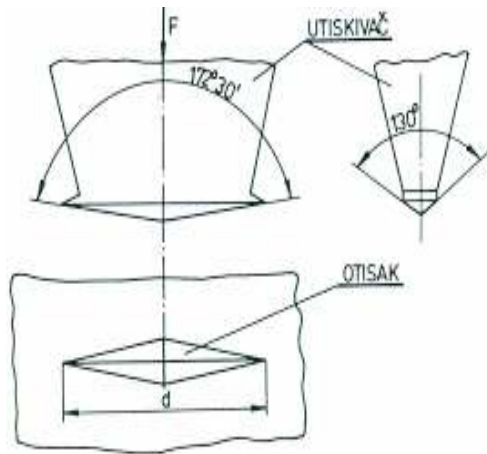
Primjer ispitivanja mikrotvrdoće na zupčaniku koji je cementiran



Slika 6.12: Ispitivanje tvrdoće zupčanika

6.4.2. Mikrotvrdoća po Knupu

- Mjerilo mikrotvrdoće po Knupu je omjer sile utiskivanja i površine otiska dijamantne piramide



$$HK = 0,102 \frac{F}{d^2 c} = 0,102 \frac{F}{d^2 0,07028}$$

$$HK = 1,451 \frac{F}{d^2}$$

gdje je: F – sila utiskivanja/N

d – veća dijagonala otiska, mm

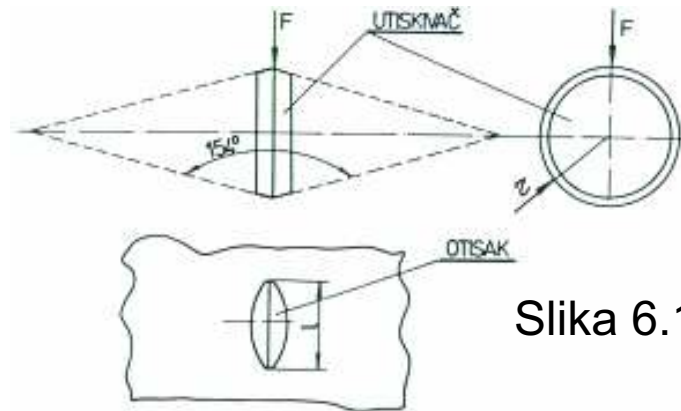
c – konstanta utiskivača=0,07028

Slika 6.13: Ispitivanje tvrdoće po Knupu

- Otisak je oblika deltoida se odnosom strana 1:30, što omogućuje daleko točnije mjerenje dijagonale otiska.
- Rezultati ispitivanja se ne mogu usporediti s rezultatima ispitivanja mikrotvrdoće po Vickersu i po Grodzinskom.

6.4.3. Mikrotvrdoća po Grodzinskom

- Mjerilo mikrotvrdoće po Grodzinskom je omjer sile utiskivanja i površine projekcije otiska kojeg ostavlja utiskivač oblika dvije zarubljene kupole.



Slika 6.14: Ispitivanje tvrdoće po Grozdinskom

- Mikrotvrdoća po Grozdinskom se određuje na osnovu izraza:

$$HM = \frac{102 F}{C \cdot l^3}$$

gdje je: **F** – sila utiskivanja, N

C – karakteristika utiskivača

l – duljina veće osi otiska, μm

- U principu metoda Grodzinski se ne razlikuje od metoda Vickersa i Knupa, i obzirom da se radi o mikrotvrdoći sila utiskivanja ne prelazi 2 N.
- Utiskivač je oblika dvije sastavljene zaobljene kupole koje su spojene po većoj bazi, a odlikuje se malom osjetljivošću na lom u toku rada.
- Otisak od utiskivanja je zaobljen, s odnosom uzdužne i poprečne osi 22:1. Dubina samog otiska je 1/80 duže osi otiska, što omogućuje ispitivanje još tanjih uzoraka nego li metoda Knoopa.
- Velika prednost metode Grodzinskog je u mogućnosti zaokretanja utiskivača poslije oštećenja za neki kut, čime se višestruko produžuje radni vijek penetratora.

6.5. ISPITIVANJE TVRDOĆE DINAMIČKIM METODAMA

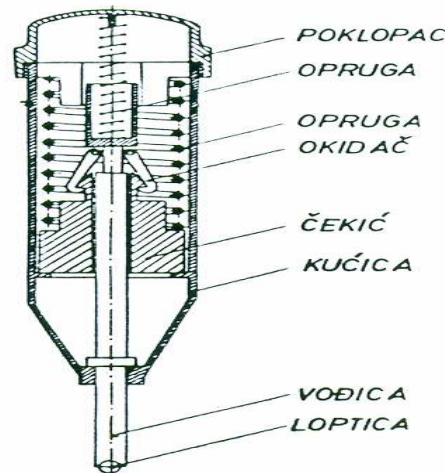
- a) postupak s konstantnom energijom udara s oprugom
- b) Poldijev postupak s čekićem

U pogonskoj praksi kontrole tvrdoće razvijene su brze metode za određivanje tvrdoće koje prostim i kratkotrajnim ispitivanjem daju zadovoljavajuće rezultate. Ispitivanje se izvodi lopticom koja se udarom utiskuje u ispitivani materijal. Mjeri se promjer otiska i tvrdoća se računa kao po Brinellu, po formuli

$$HB = \frac{0,102 \cdot 2F}{\pi D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)}$$

6.5.1. Postupak s konstantnom energijom udara

- Kod ove metode se uvijek ista potencijalna energija tlačene opruge prenosi kao udar kuglice koja se utiskuje u ispitivani materijal. Kuglica ima promjer 10 mm.

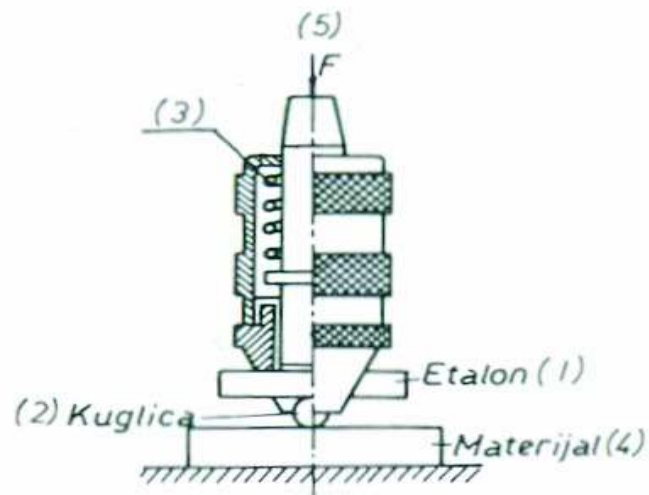


Slika 6.15: Ispitivanje tvrdoće postupak s konstantnom energijom udara

- Penetrator mora biti uvijek okomit na ispitivani uzorak. Uređaj je vrlo pogodan za ispitivanje materijala na skladištu i najpovoljniji je kod ispitivanja čeonog poprečnog presjeka šipkastih profila.

6.5.2. Poldijeva metoda

- Poldi metoda predstavlja usporednu metodu za ispitivanje tvrdoće, a izvodi se u slučajevima kada se ne mogu koristiti opisane statičke metode, npr. uslijed veličine ispitivanih predmeta koji se ne mogu uništiti.



Slika 6.16: Ispitivanje tvrdoće Poldijevom metodom

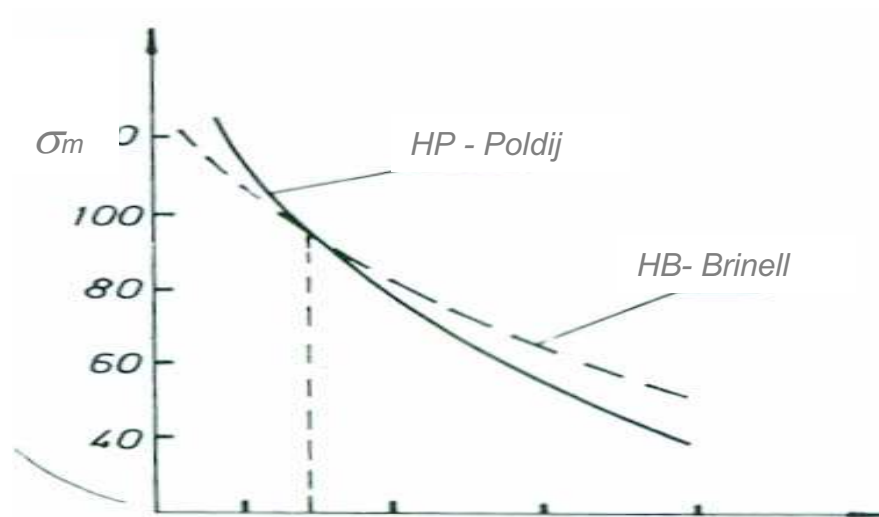
Poldi metoda se izvodi udarnim djelovanjem sile utiskivanja preko čelične kuglice 10mm istovremeno na ispitivani materijal i etalon poznate tvrdoće. Udar se ostvaruje ručno, čekićem mase 0,5kg.

- Poldijevom metodom tvrdoća se određuje po izrazu:

$$HB = HBS \cdot \frac{D - \sqrt{D^2 - d_e^2}}{D - \sqrt{D^2 - d_m^2}}$$

gdje je:

- HBS –tvrdoća etalona po metodi Brinella (poznata veličina, obično $HBS = 201$)
- d_e – promjer otiska kalote u etalonu, mm
- d_m – promjer otiska kalote u materijalu, mm
- D – promjer kuglice, $D = 10$ mm.



Slika 6.17: Usporedne vrijednosti tvrdoće po Brinellu i Poldiju

6.6. ISPITIVANJE TVRDOĆE METODAMA ELASTIČNOG ODSKOKA

- Princip ispitivanja tvrdoće metodom elastičnog odskoka temelji se na vizualnom praćenju odskoka utiskivača, ili pak samog predmeta. Visina odskoka ovisna je od materijala, njegove tvrdoće, modula elastičnosti, stanja površine, mase predmeta i sl.
- U praksi se susreće nekoliko postupaka, a najznačajniji su:
 - a) skleroskopska metoda po Shoreu*
 - b) duroskopska metoda*
 - b) Pajcova metoda.*
- Osnovni nedostatak ovih metoda je nemogućnost usporedbe različitih materijala, s obzirom da odskok u najvećoj mjeri ovisi o modulu elastičnosti.

6.7. Parametri koji utječu na mjerenje tvrdoće

- a) *brzina djelovanja sile*
- b) *temperatura ispitivanja*
- c) *vrijeme djelovanja sile*

Utjecaj brzine

Brzina djelovanja sile ispitivanja nema kod tvrdih metala onoliki utjecaj kakav je kod vlačnih ili tlačnih ispitivanja jer se plastičnost vrlo brzo smanjuje.

Kod mekših metala, utjecaj je znatno veći i zato se preporučuju manje brzine. Zbog mehanizama ojačanja i rekristalizacije, vrijeme djelovanja sile kod ispitivanja ima utjecaj.

Utjecaj temperature

- Na povišenim temperaturama metali imaju manju tvrdoću.
- Stoga se sila povećava sa manjom brzinom, tj. djelovanje sile je duže.
- Ovo je posljedica relativno sporih procesa u metalu (fazne promjene, deformacija, oporavak, rekristalizacija, izlučivanja, itd.).

Utjecaj vremena djelovanja sile

- Vrijeme djelovanja sile ovisi o ispitivanom materijalu.
- Što je materijal mekši, vrijeme djelovanja sile je duže.
- Na taj način daje se prilika očvršćivanju materijala uslijed deformacije, a koje bi trebalo zaustaviti prodiranje kuglice.

NORME

- HR EN ISO 6506-1, ispitivanje tvrdoće po Brinellu
- HR EN ISO 6507-1, ispitivanje tvrdoće po Vickersu
- HR EN ISO 6508-1, ispitivanje tvrdoće po Rockwellu
- DIN EN 10003, Ispitivanje tvrdoće po Brinellu

7. TEHNOLOŠKA ISPITIVANJA

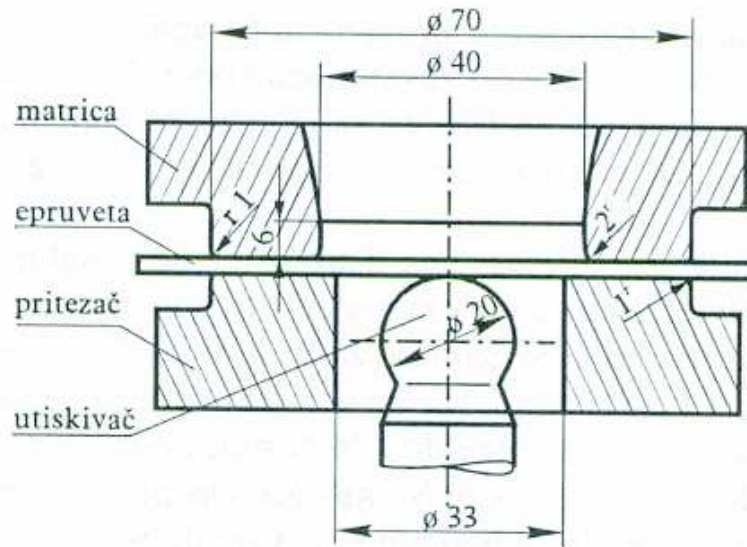
Tehnološka ispitivanja:

- najstariji postupci ispitivanja materijala
- provode se s ciljem ocjene ponašanja materijala u procesu preradbe
- rezultati ispitivanja uglavnom nisu mjerljivi
- predstavljaju ocjenu da li proba zadovoljava postavljeni zahtjev metode ispitivanja
- postupci ispitivanja su standardizirani.

7.1. TEHNOLOŠKA ISPITIVANJA LIMOVA I TRAKA

- Ispitivanje limova i traka izvlačenjem
- Ispitivanje limova i traka savijanjem
- Ispitivanje limova i traka uvijanjem

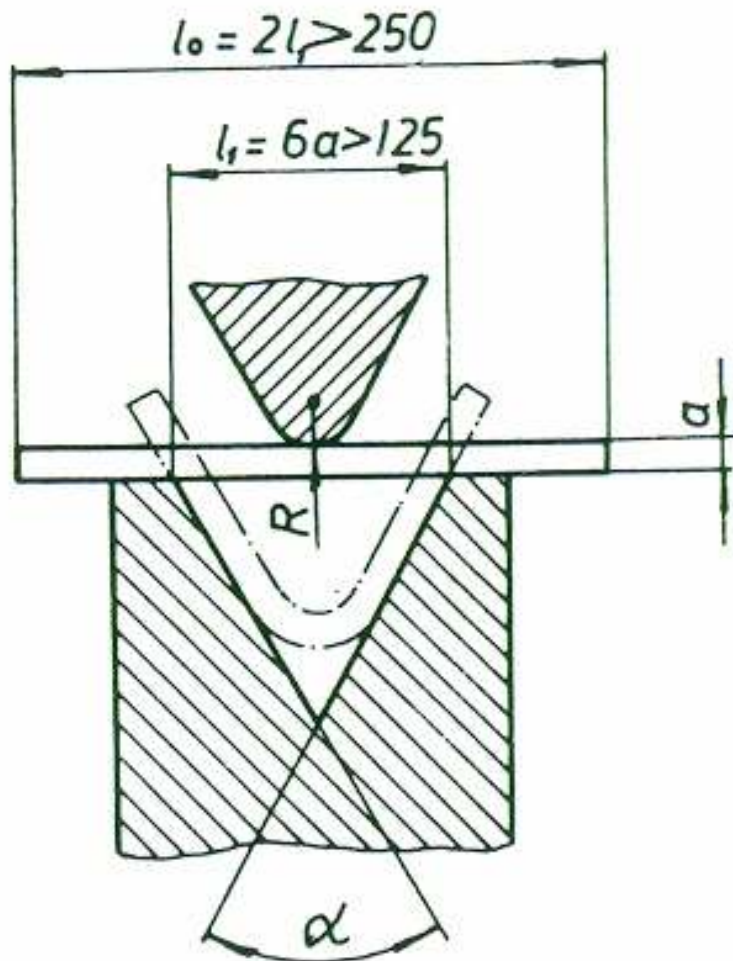
7.1.1. Ispitivanje limova i traka izvlačenjem po Erichsenu



Slika 7.1: Ispitivanje limova i traka izvlačenjem po Erichsenu

- Svrha ispitivanja – ocjena sposobnosti dubokog izvlačenja limova i traka
- Ispituju se uzorci debljine 0,2 do 2mm i širine ≤ 90 mm
- Pokazatelj deformabilnosti je dubina prodiranja utiskivača do pojave pukotine u uzorku
- Postupak ispitivanja propisan je normom

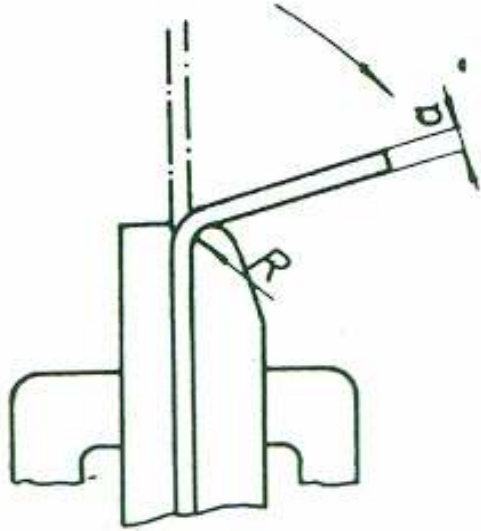
7.1.2. Ispitivanje trake savijanjem



Slika 7.2: Ispitivanje traka savijanjem

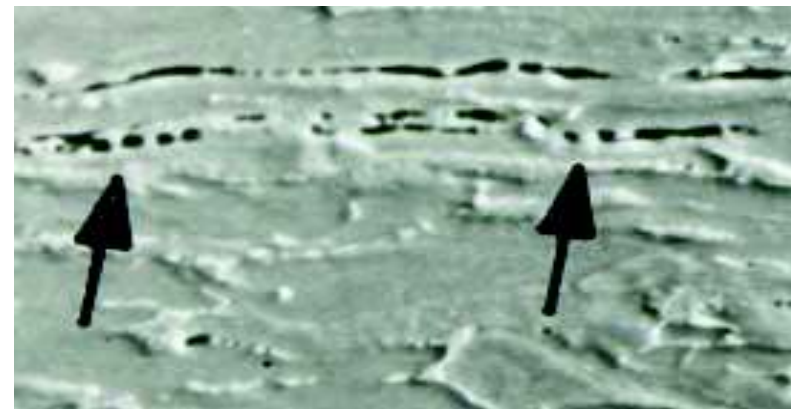
- Ispitivanje se provodi u hladnom ili toplom stanju, ovisno o zahtjevu
- Ispitni uzorak se savija do pojave prve pukotine
- Kod veće plastičnosti traka, savijanje se izvodi preko trna dok krajevi ispitnog uzorka ne budu paralelni
- Ocjena sposobnosti savijanja limova i traka je propisani kut savijanja

7.1.3. Ispitivanje trake uvijanjem



- Provodi se zbog ispitivanja unutarnjih grešaka u materijalu
- Najčešća greška je dvoplatnost

Slika 7.3: Ispitivanje traka uvijanjem

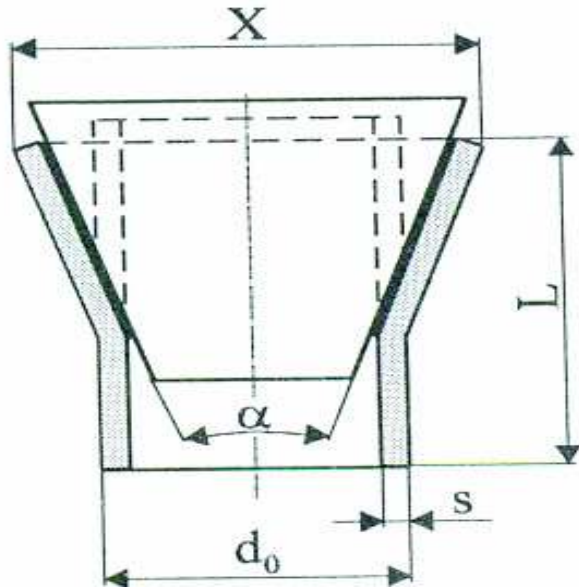


Slika 7.4: Dvoplatnost

7.2. TEHNOLOŠKA ISPITIVANJA CIJEVI

- Ispitivanje cijevi proširivanjem
- Ispitivanje cijevi prirubljivanjem
- Ispitivanje cijevi savijanjem
- Ispitivanje cijevi spljoštavanjem
- Ispitivanje cijevi vlačnim prstena
- Ispitivanje cijevi uvijanjem
- Ispitivanje cijevi izvijanjem

7.2.1. Ispitivanje cijevi proširivanjem

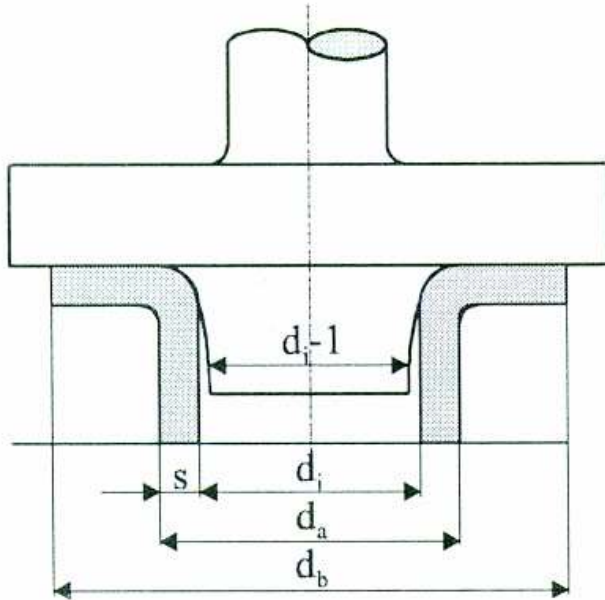


- Svrha ispitivanja: ispitivanje makroskopskih defekata u stijenci cijevi (pukotine, ljuske, dvoplatnost, ..) ili kao ocjene deformabilnosti cijevi u daljnjoj preradbi

Slika 7.5: Ispitivanje cijevi proširivanjem

Ispitivanje se provodi na kidalici ili preši, na uzorcima cijevi s konusnim utiskivačima (trnovima) iz tvrdog čelika s kutom konusa 30, 45 i 60 stupnjeva. Ploština utiskivača mora biti glatka. Brzina utiskivača je do 50 mm/min. Uzorci se proširuju ili do loma ili do normom propisanog povećanja promjera cijevi

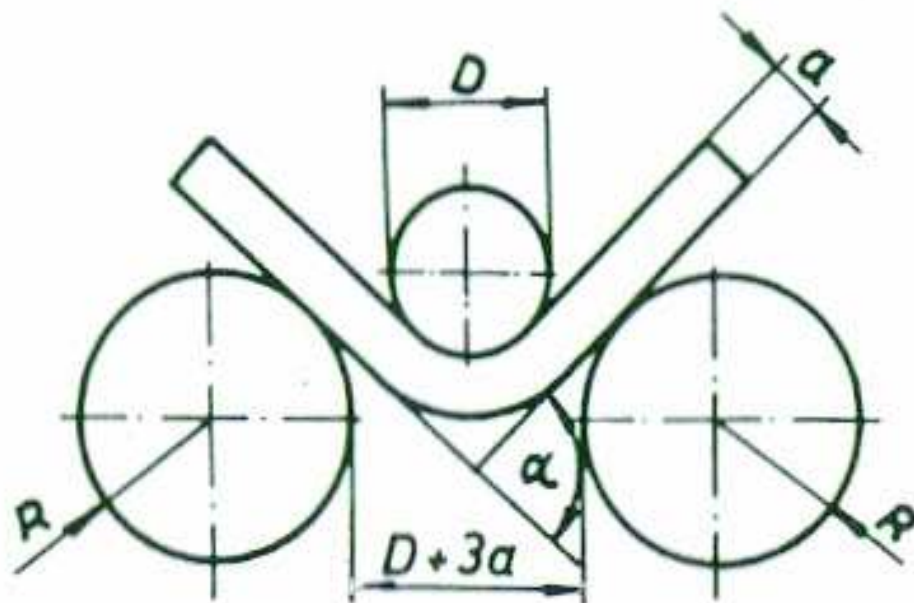
7.2.2. Ispitivanje cijevi prirubljivanjem (pertlovanje)



- Svrha ispitivanja – procjena sposobnosti deformacije cijevi oblikovanjem obruba pod pravim kutom.
- Prsten cijevi duljine L se najprije proširi, a zatim se prošireni dio prirubluje pod pravim kutom
- utvrđuju se defekti u materijalu na mjestu maksimalne deformacije

Slika 7.6: Ispitivanje cijevi prirubljivanjem

7.2.3. Ispitivanje cijevi savijanjem

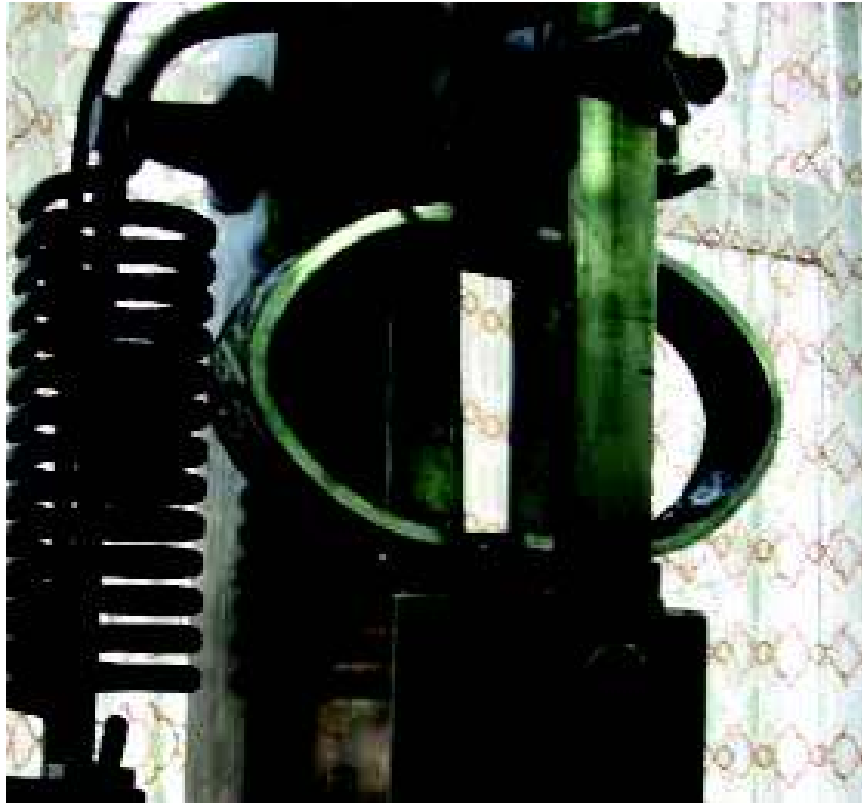


Slika 7.7: Ispitivanje cijevi savijanjem

Cijev određene dužine postavlja se na oslonce kidalice ili preše. Savijanje cijevi izvodi se preko trna propisanog promjera, polagano, kako bi se osiguralo plastično tečenje materijala.

Trnovi imaju žljebast oblik koji odgovara promjeru cijevi. Šavne cijevi ispituju se tako da se savijanje provodi po varu, da je var nasuprot trnu ili pod kutom od 90° . Kut savijanja propisan je normom.

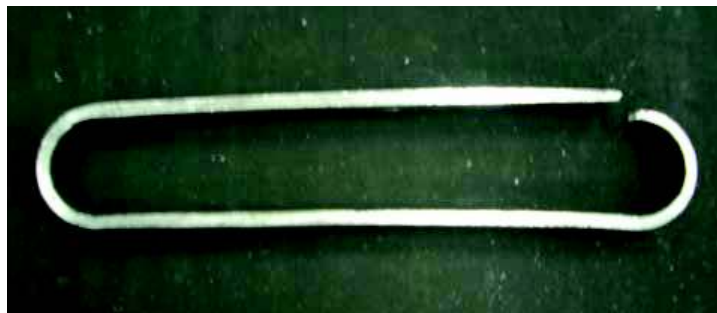
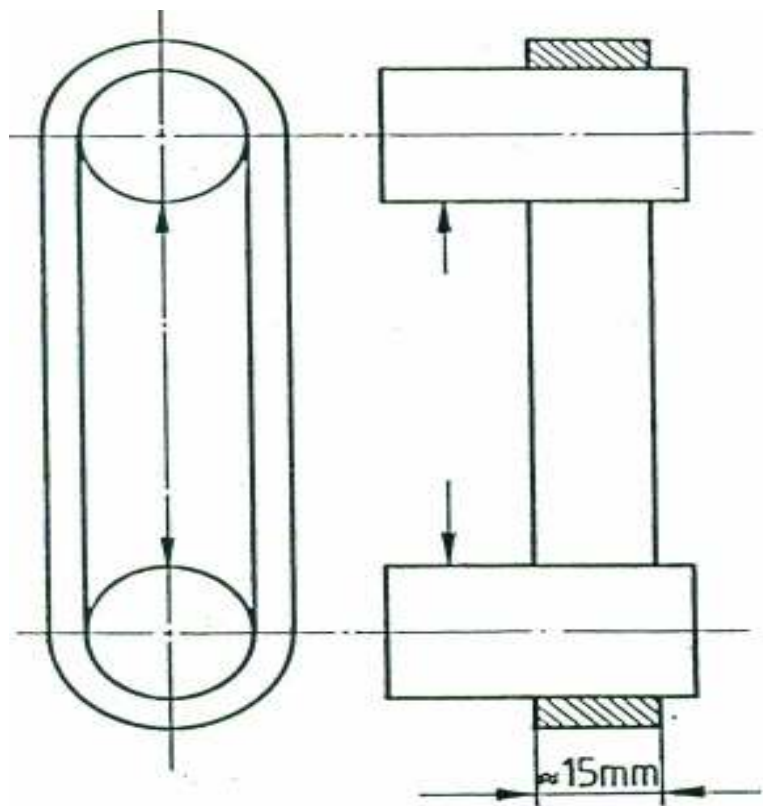
7.2.4. Ispitivanje cijevi spljoštavanjem



- Svrha ispitivanja – provjera cijevi prema zahtjevu norme s ciljem otkrivanja grešaka (ljuske, prevaljanost, pukotine, dvoplatnost, itd.)
- Kod šavnih cijevi ispitivanje se provodi s ciljem kontrole zavara. Spljoštavanje se provodi djelovanjem sile po varu i okomito na var.
- Cijevi se spljoštavaju na visinu H

Slika 7.8: Ispitivanje cijevi spljoštavanjem

7.2.5. Ispitivanje cijevi razvlačenjem prstena do loma



- Svrha ispitivanja – ispitivanje mogućnosti nastajanja ili već postojećih pukotina, ljusaka i dvoplatnosti cijevi
- Prije razvlačenja prsteni se spljoštavaju na elipsu, a zatim se u kidalicama rastežu preko dva valjka
- Brzina istežanja ne smije biti veća od 5 mm/s
- Prsteni se rastežu do loma

Slika 7.9: Ispitivanje cijevi razvlačenjem prstena do loma 302

7.2.6. Ispitivanje cijevi izvijanjem

- Ispituje se uzorak cijevi dužine 90 – 100 mm
- Ispitivanje se provodi na prešama djelovanjem tlačne sile do pojave izvijanja cijevi
- Ovisno o namjeni cijevi, normom je propisana minimalna sila pri kojoj ne smije doći do izvijanja cijevi
- Provodi se uglavnom na konstrukcijskim cijevima namijenjenim visokim gradnjama (skele, noseći stupovi itd.)

Tehnološke probe šavne cijevi iz čelika mikrolegiranog niobijem

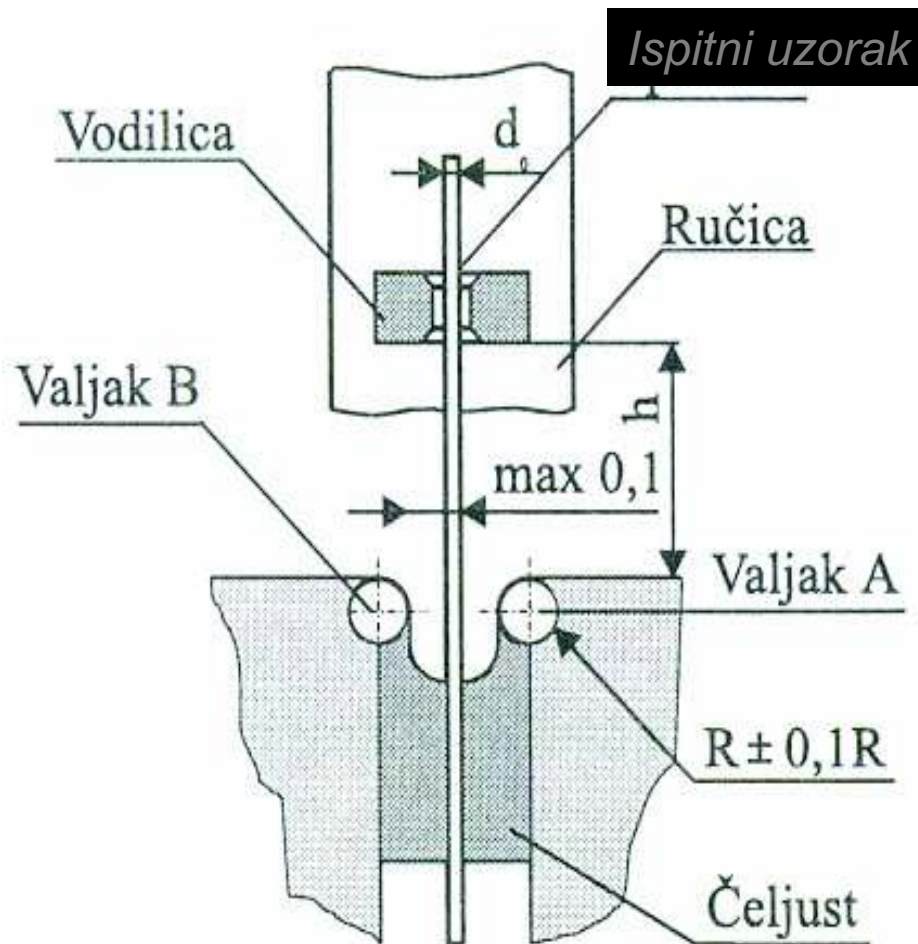


Slika 7.10: Tehnološka ispitivanja šavnih cijevi

7.3. OSTALA TEHNOLOŠKA ISPITIVANJA

- Ispitivanje žice uvijanjem
- Ispitivanje zavarenih spojeva

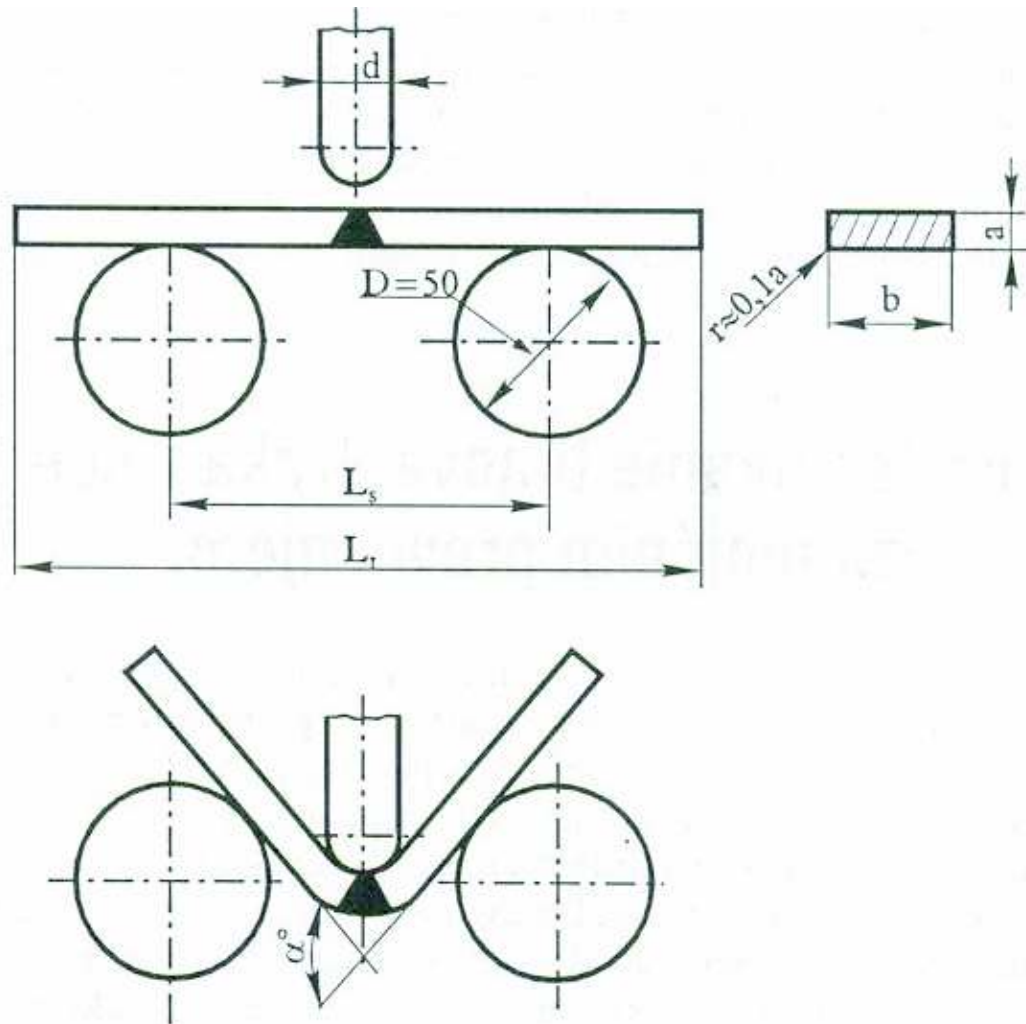
7.3.1. Ispitivanje žice previjanjem



- svrha ispitivanja – sposobnost žice za torzijsku deformaciju u jednom smjeru
- provodi se na žicama promjera 0,3 mm i većeg
- ispitivanje se provodi ili do određenog broja previjanja ili do loma žice
- Postupak ispitivanja je propisan normom

Slika 7.11: Ispitivanje žica previjanjem

7.3.2. Ispitivanje zavarenih spojeva



- svrha ispitivanja – kvaliteta zavarenog spoja
- ispitivanje se provodi do pojave prve pukotine koja se registrira golim okom
- postupak ispitivanja je propisan normom

Slika 7.12: Ispitivanje zavarenih spojeva savijanjem

NORME

- HRN C A4 021, Ispitivanje limova i traka izvlačenjem
- HRN C A4 022 Ispitivanje cijevi proširivanjem prstena
- HRN C A4 007 Ispitivanje čeličnih cijevi spljoštavanjem
- DIN 50111, Tehnološka ispitivanja savijanjem
- DIN 50153, ispitivanje limova i traka izmjeničnim previjanjem

8. *ISPITIVANJA BEZ RAZARANJA*

(DEFEKTOSKOPSKA ISPITIVANJA)

- **DEFEKTOSKOPIJA je skup metoda za pronalaženje skrivenih grešaka u materijalu na takav način da ispitivani materijali ostaju nakon pregleda neoštećeni.**
- **Osnovne zadaće defektoskopije**
 - osigurati pouzdanost proizvoda i jednaku kvalitetu po cijelom volumenu;
 - spriječiti havarije redovitom kontrolom proizvoda u eksploataciji;
 - smanjiti proizvodne troškove u eksploataciji pravovremenim odvajanjem neispravnih dijelova
 - omogućiti uvođenje novih materijala i tehnoloških procesa u cilju postizanja jeftinijeg i sigurnijeg proizvoda.

- Danas su razvijene i usavršene metode koje su sastavni dio kontinuiranog procesa i one sortiraju proizvode na dobre i loše.
- Ispitivanja bez razaranja (defektoskopska ispitivanja) obično se provode s minimalno dvije defektoskopske metode i uglavnom su nadopunjena kontrolnim ispitivanjima s razaranjem.
- Princip metoda bez razaranja: emitira se određena vrsta energije u ispitivani proizvod kontinuirano ili u ciklusima i mjeri se njena promjena na način ovisan o metodi.

•Upotrebljavaju se sljedeći oblici energije:

1. u električnom polju (ispitivani proizvod mora biti vodič)
2. u magnetskom polju (ispitivani proizvod mora biti feromagnetičan)
3. u elektromagnetskom polju (x i γ zrake)
4. mehaničke prirode (ultrazvučni valovi i titraju).

Greške u metalima

Greške koje se mogu pojaviti kod ispitivanja metalnih materijala su:

1. *Pojedinačne*

(različito narušavanje homogenosti – poroznosti, pukotine, flokne, raslojavanja itd.). Pojedinačni defekti su locirani u ograničenom području i mogu biti točkasti, linijski, površinski i volumenski. Prema rasporedu dijele se na vanjske (površinski i potpovršinski) i unutrašnje (u dubini materijala)

2. *Raspoređene u ograničenim zonama*

(likvaciono skupljanje, zone nepotpunog kaljenja, korodirana područja)

3. *Ravnomjerno raspoređene po čitavom unutarnjem presjeku ili po površini*

(nehomogenost kemijskog sastava, strukture ili mehaničkih svojstava).

I ***Po nastanku se dijele na greške:***

- topljenja i lijevanja
- plastične deformacije
- toplinske obradbe
- mehaničke obradbe
- montaže i zavarivanja
- uskladištenja
- eksploatacije

Greške topljenja i lijevanja:

- odstupanje od zadanog sastava
- uključci
- lunke
- poroznosti
- plinski mjehuri
- likvacije
- tople pukotine
- hladne pukotine

Greške plastične deformacije:

- površinske i unutarnje pukotine
- dvoplastnost
- prevaljanost i udubine
- risevi
- raznostijenost
- flokne

Greške toplinske obradbe:

- pregrijanost
- neravnomjerna struktura
- toplinske pukotine
- neodgovarajuća debljina zakaljenog sloja
- razugliččenost
- vodikove pukotine.

Greške mehaničke obradbe

- inicijalne pukotine od mehaničke obradbe
- pregrijavanje uslijed brušenja ili rezanja.

Greške montaže i zavarivanja

- mehaničke greške od transporta
- pukotine u varu
- unutrašnja naprezanja u varu i zoni utjecaja topline
- Neproverenost.

Greške i uskladištenja

mehanička oštećenja

- površinska korozija
- interkristalna korozija.

Greške eksploatacije

zamor materijala

- puzanje
- Korozija.

Kako će se greške ponašati kod eksploatacije strojnog dijela ili konstrukcije s defektom ovisi o:

1. materijalu

- osjetljivost materijala na koncentraciju naprezanja
- osjetljivost materijala na nastajanje greške

2. samoj grešci

- vrsti greške
- položaju greške u odnosu na smjer naprezanja
- veličini i pravcu širenja greške

3. uvjetima eksploatacije

- vrsti i obliku naprezanja
- trajanju opterećenja
- radnim uvjetima (temperatura, agresivni mediji, ...)

Kod ocjene prihvatljivosti ili neprihvatljivosti greške polazi se od uvjeta eksploatacije ispitivanog metalnog proizvoda . Stupanj opasnosti defekta ovisi o:

- samoj grešci
- prisutnost greške u zoni koncentracije naprezanja
- veličini i položaju greške
- namjeni proizvoda.

Najčešće upotrebljavane metode defektoskopije:

- optičke (vizualne)
- radijacijske
- elektro i/ili magnetske metode
- ultrazvučna
- penetracijska (tekućinama)
- kapilarne metode
- toplinske metode
- ostale (često kombinacija navedenih).

- Danas je u skoro svakom proizvodnom procesu proizvodnje i prerade metalnih materijala jedna od metoda defektoskopije neizbježna.
- Za svaki tip greške, ovisno o obliku strojnog dijela u kojem se nalazi, te veličini i položaju greške, postoji metoda defektoskopije koja će osigurati najbolju vidljivost i interpretaciju. Vrlo je mali broj grešaka koje se daju otkriti svim metodama jer svaka metoda ima određena ograničenja u pogledu složenosti oblika ispitivanog komada, debljine, stanja površine itd..

8.1. OPTIČKA (VIZUALNA) ISPITIVANJA

- Najstariji način kontrole bez razaranja
- Neko vrijeme bila je zapostavljena zbog razvoja drugih defektoskopskih metoda
- Razvojem informatičke opreme ponovno dobiva na značenju

Suvremena vizualna kontrola

- Suvremene endoskopske metode su vizualne metode koje omogućavaju pregled nedostupnih ploština.
- Danas se koriste:
 - vizualna kontrola
 - endoskopska,
 - boroskopska metoda
- Zahvaljujući kompjutorskoj tehnologiji koristi se u
 - kontroli zavarenih spojeva,
 - kontroli unutrašnjosti stjenke nekog cijevnog ili kuglastog oblika (npr. u kotlogradnji)
- Često je jedina metoda u procjeni preostalog radnog vijeka nekog proizvoda.

Vizualna kontrola

- Vizualna kontrola je prva nerazorna metoda koja je primijenjena.
- Ispitivanje se provodi na način da se ispitivana ploština osvjetli i promatra na propisanoj udaljenosti sa ili bez optičkih pomagala i instrumenata
- Vizualna kontrola obično je prva metoda, najčešće je potrebno primijeniti i druge metode

8.1.1. Endoskopska kontrola

- Kamera malog promjera, 6 mm ili čak 4 mm, dovodi se na različite načine na mjesto ispitivanja.
- Kamera snima ispitivano mjesto i istovremeno je povezana s računalom tako da se na ekranu može pratiti samo snimanje i odabrati parametre snimanja te dobiti informaciju o postojanju greške, njenoj veličini, podrijetlu, i utjecaju na daljnju eksploataciju.
- Slika se može obrađivati na računalu, uvećavati i dobiti velika preciznost u mjerenju.



Slika 8.1: Endoskop

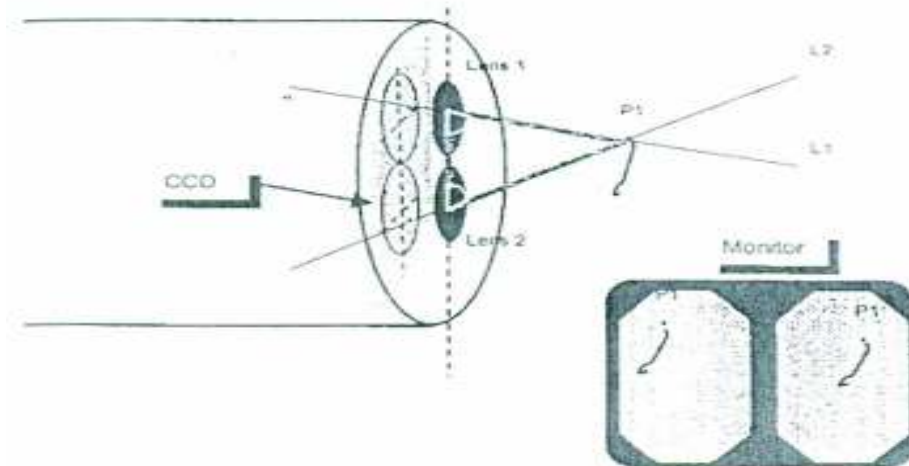
IPLEX SA (STEREO MEASUREMENT)

Postoji nekoliko načina mjerenja greške:

- kontaktno mjerenje
ima puno ograničenja vezanih za oslanjanje kamere, pristupačnost pogreški isl.
- Bezkontaktno mjerenje
 - a) laserom,
 - b) stereo kamerama

Mjerenje laserom vrlo je pogodna i praktična metoda.
Praktički je nezamjenljiva za izmjere dubine oštećenja.

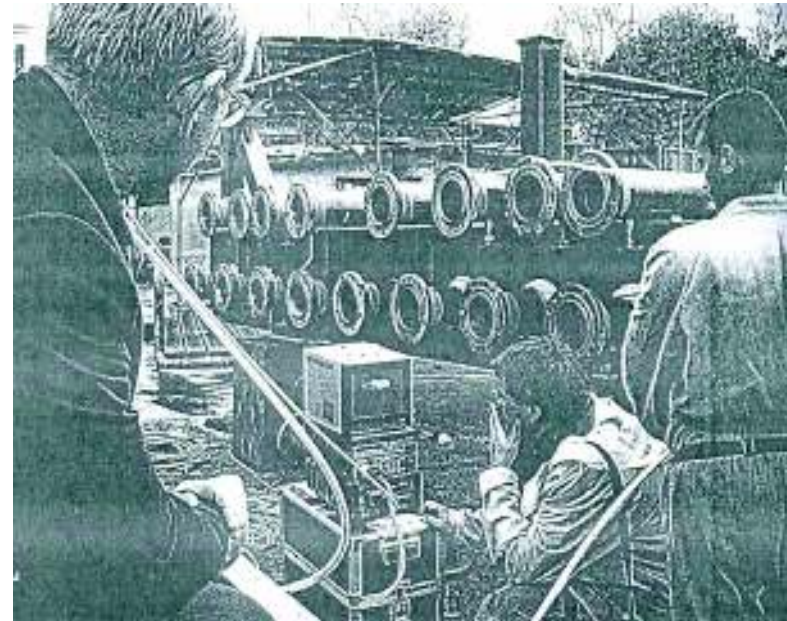
- Mjerenja **stereo kamerama** imaju neka ograničenja, ali ipak se danas zbog univerzalnosti sve više upotrebljavaju.
- Princip ispitivanja je promatranje pogreške i snimanje te pogreške s dvije odvojene kamere
- Kompjutorskom obradom rezultata mjerenja i trigonometrijskom analizom dobiju se vrlo brzo i precizno informacije o dimenzijama greške.
- Jedini nedostatak su dimenzije i oblik takve stereo kamere jer je njena veličina ispod 6 mm.



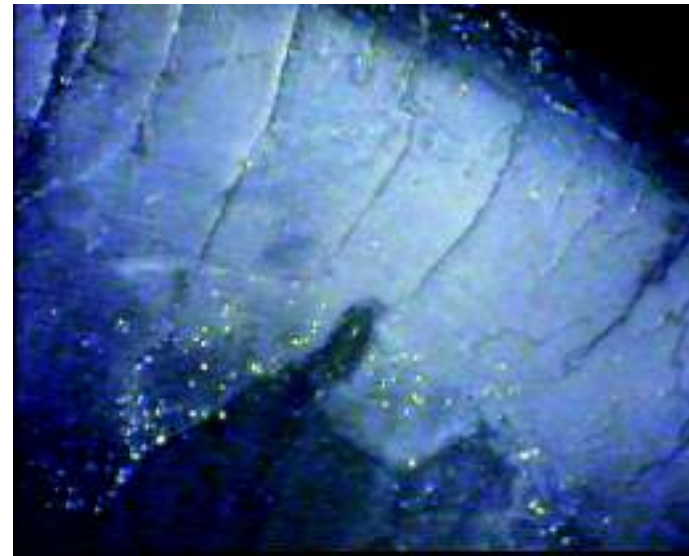
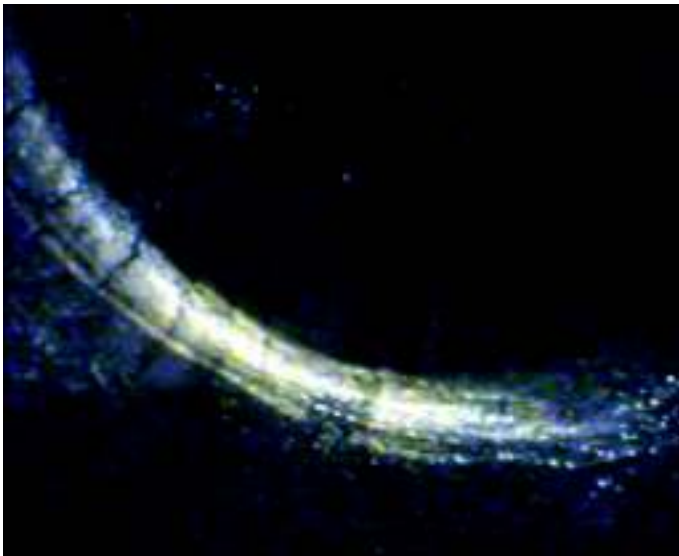
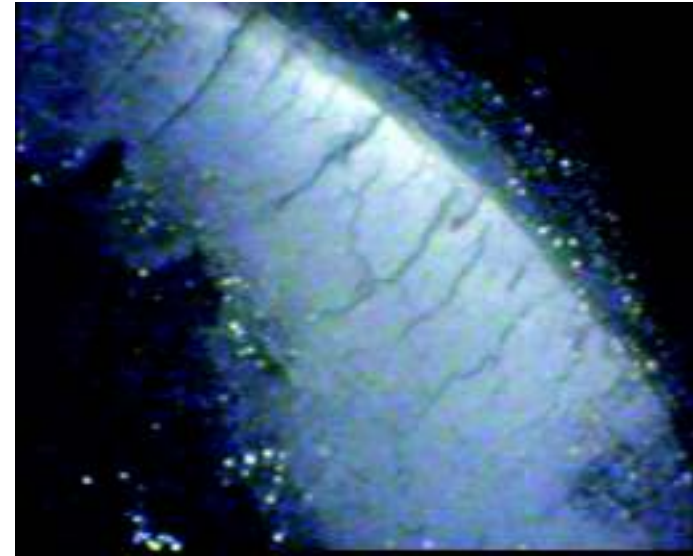
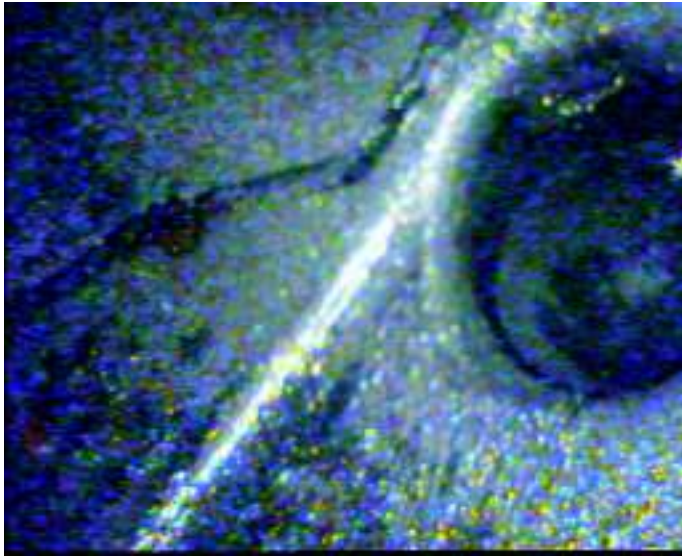
Slika 8.2: Endoskopska ispitivanja



- Ovim mjerenjem mogu se utvrditi sve dimenzije bilo kakvih defekata ili oštećenja nastalih u eksploataciji, te odstupanja od zadanih dimenzija bez obzira na položaj greške.
- Endoskopskom kontrolom može se otkriti većina grešaka iz norme EN 26520. U tablici 8.2. prikazane su mogućnosti primjene endoskopske kontrole u usporedbi s ostalim metodama bez razaranja.



Slika 8.3: Endoskopska ispitivanja cijevi



Slika 8.4: Karakteristični primjeri pukotina koje su detektirane endoskopom 330

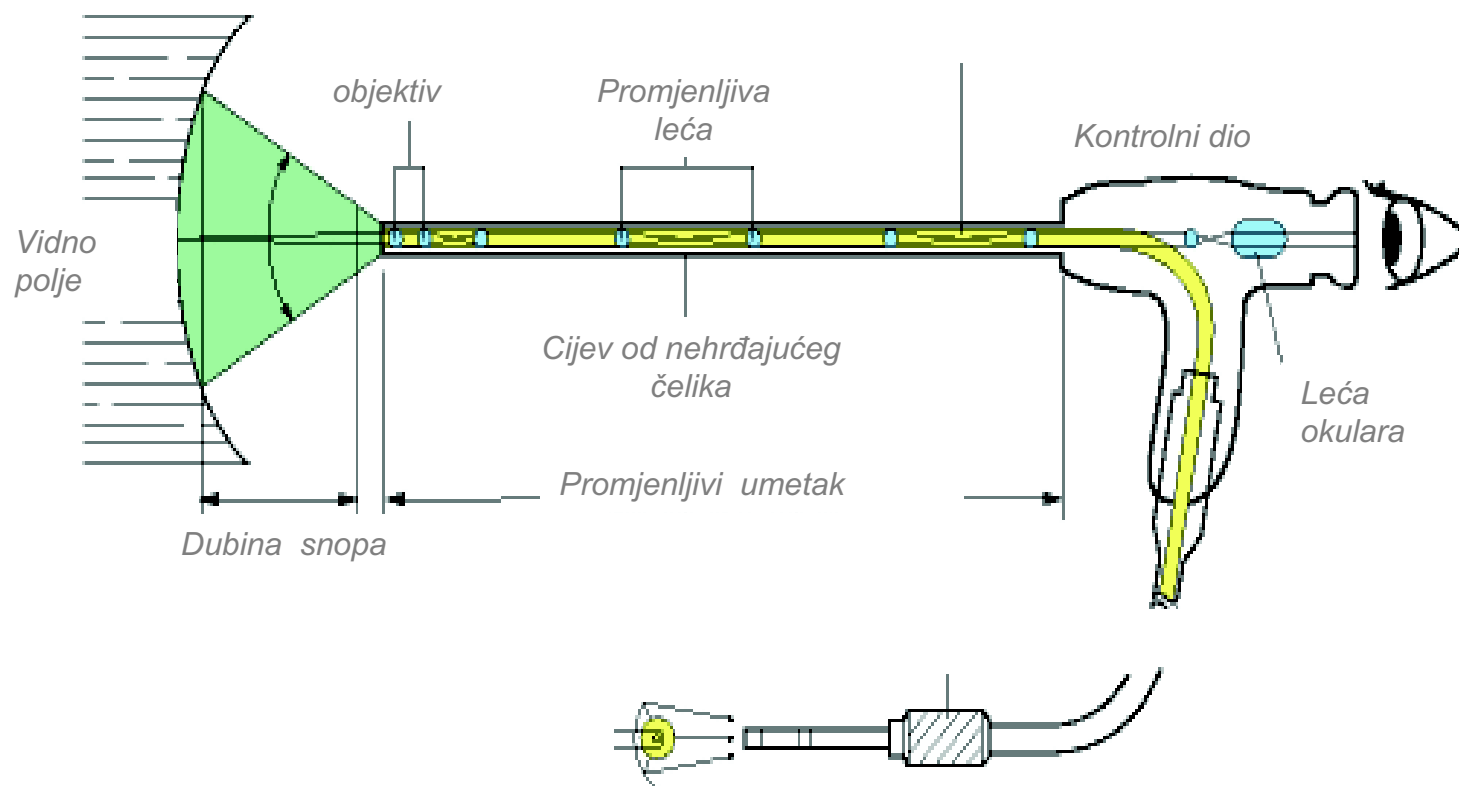
Tablica 8.2: Mogućnosti primjene endoskopske kontrole u odnosu na ostale metode bez razaranja.

			Metode	kontrole	bez	razaranja	(KBR)
TIPOVI	POGREŠAKA	Vizu- alna	Endosko- pska	Prozrači- vanje	Pro- zvuča- vanje	Magnetna ispitivanja	Ispitiva- nje penetra- ntima
	Manje površinske	(+)	(+)	-	(+)	+	+
PUKOTINE	Veće površinske	+	+	(+)	+	+	+
	Podpovršinske	-	-	(+)	+	(+)	-
POROZNOST	Površinska	+	+	+	(-)	+	(+)
	U zavaru	-	-	+	+	-	-
ČVRSTI	UKLJUČCI	-	-	+	+	-	-
NALJEPI	/401/	-	-	-	+	-	-
NEDOVOLJNA PROVARENOST	Vanjsko	+	+	+	(+)	+	+
	U varu	-	-	+	+	(-)	-
POGREŠKE		+	+	(-)	(-)	-	-
OSTALE		+	+	-	-	(-)	(-)

+ dobra mogućnost kontrole, (+) mogućnost uvjetovana veličinom i položajem,
(-) vrlo ograničena primjena koja se ne preporuča, - neprimjenjiva kontrola

8.1.2. Boroskopija

Slično endoskopiji, ali kamera se postavlja ispred uređaja, kao na slici



Slika 8.5: Boroskopska ispitivanja

Boroskop R080-064-045SW115-50ZM25

Boroskop

- duljina 3,5 m
- promjer 6 mm
- pet vrsta adaptera (izravan, kutni pogled s različitim kutem gledanja, stereo adapter)
- spremanje slika u elektronskom obliku
- mogućnost zvučnog zapisa i kraćeg video zapisa



Slika 8.6: Boroskop R080-064-045SW115-50ZM25

8.2. ISPITIVANJE PROZRAČIVANJEM

- Ispitivanje metalnih materijala primjenom rendgenskih (x) zraka ili radioaktivnih zračenja (γ zraka) moguće je utvrditi prisutnost unutrašnjih grešaka, defekata ili nehomogenosti poluproizvoda i gotovih proizvoda
- Radigrafska defektoskopija zasnovana je na svojstvima x i γ zraka. One prolaze kroz metal i pri tome gube na intenzitetu. Slabljenje intenziteta je manje u koliko prolaze kroz greške i nehomogenosti.

- Drugo bitno svojstvo:

x i γ zraka je da ostavljaju trag na filmskoj emulziji (kao i svjetlosne zrake – fotoefekt), na čemu se i temelji ispitivanje grešaka u unutrašnjosti materijala na industrijskim folijama .

Metode prozračivanja

- **Radiografija**
rendgensko ispitivanje
- **Gamagrafija**
ispitivanje s radioaktivnim izotopima

8.2.1. Radiografska ispitivanja

- *rendgenski zraci otkriveni su 1895. (fizičar Röntgen).*
- rendgenski (X) zraci su elektromagnetske prirode, male valne duljine (od 0,66 do 100 nm) i nastaju pri električnom pražnjenju u vakuumu.

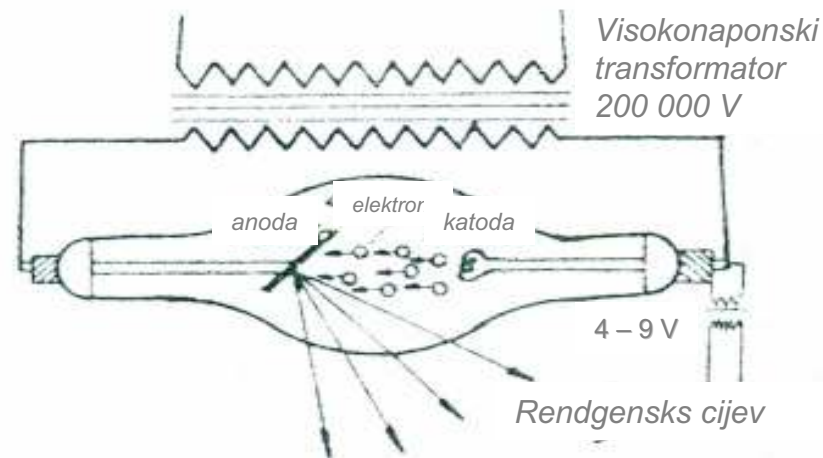
Za njihovo korištenje u tehnikama ispitivanja materijala potrebno je:

- na pogodan način dobiti izvjestan broj slobodnih elektrona
- primorati elektrone da se kreću u određenom pravcu s velikom brzinom
- staviti na put njihovog kretanja prepreku koja će osigurati njihovo kočenje
- izmjeriti stupanj kočenja.

■ Anoda je napravljena od bakrenog stošca hlađenog vodom na kojoj se nalazi specijalna pločica – anodno ogledalo, i na njoj se koče elektroni katodnih zraka.

■ U staklenoj cijevi s visokim vakuumom smještene su dvije elektrode (anoda i katoda). Spirala katode iz volframove žice zagrijava se strujom 3-4 A, pri naponu 4 – 9 V. Metalnu prepreku (za kočenje kretanja elektrona) čini anoda.

Da bi elektroni dobili neophodnu brzinu i određeni pravac kretanja upotrebljava se visoki napon (399.000 V i više) pri čemu se postiže veliko ubrzanje elektrona.



- Slika 8.7: Dobivanje rendgenskih zraka u elektronskoj cijevi

- Energija elektrona ovisna je o električnom naboju elektrona e i naponu ubrzanja elektrona U .

$$e U = \frac{hc}{\lambda}$$

- Ako se sva energija $e \times U$ pretvori u kvant rendgenskog zračenja u momentu udara elektrona u anodu, to se dužina vala može izračunati po sljedećem izrazu.

$$\lambda = \frac{hc}{eU}$$

- Gdje je : h - Planckova konstanta
 C - brzina širenja zraka

- Po svojoj prirodi rendgenske zrake su elektromagnetni valovi elektromagnetskog spektra.
- Približna podjela elektromagnetskog spektra na različite grupe po dužini vala dana je u tablici 8.3:

Tablica 8.3: Podjela elektromagnetskog spektra

Vrsta zraka	Dužina vala
Kozmičke zrake	$10^{-7} - 10^{-31}$ nm
Gama zrake	0,0001- 0,004 nm
rendgenske zrake	00,006 - 1 nm
Ultravioletne zrake	1 - 400 nm
Vidljive zrake	400 -700 nm
Infracrvene zrake	700nm –0,1mm
Radio valovi	0,1mm–20000m

$1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ cm}$

Količina apsorbiranih rendgenskih zraka pri prolazu kroz čvrsto tijelo određene debljine nije proporcionalno debljini tijela.

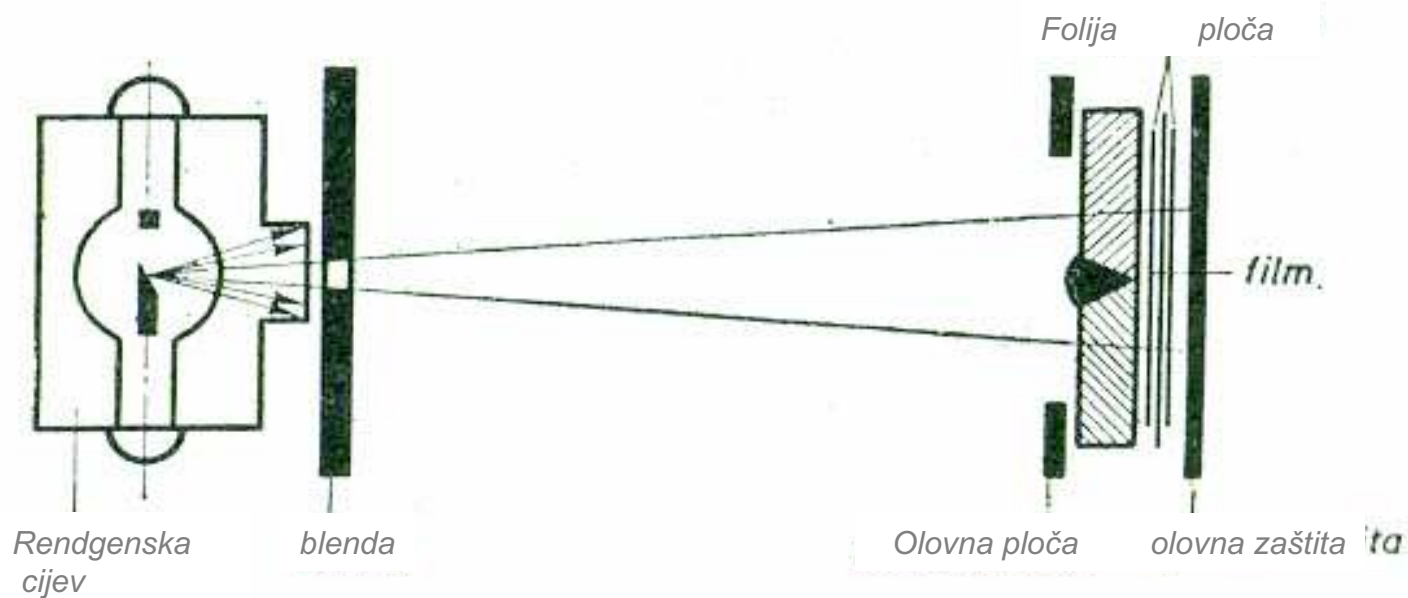
- Rendgenske zrake slično svjetlosnim zrakama padaju na fotografski film ili ploču i izazivaju razlaganje bromida srebra (AgBr) koji se nalazi u sastavu fotoemulzije.
- Svjetlosne zrake izazivaju fotokemijski procese uglavnom na površinskim slojevima foto emulzije, dok rendgenske zrake uslijed svoje velike prodornosti izazivaju razlaganje srebrenog bromida ravnomjerno po čitavoj debljini sloja emulzije.
- Logaritam odnosa intenziteta zraka koje padaju na određeni dio filma prema intenzitetu zraka koje prolaze kroz njega naziva se gustoća zacrnjenja, S:

$$s = \log \frac{l_0}{l_1}$$

- **RADIOGRAFIJA** je područje primjene rendgenskih zraka za otkrivanje unutrašnjih grešaka i nehomogenosti u materijalu. Između rendgenske cijevi i fluorescentnog ekrana ili filma postavlja se ispitivani uzorak.
- Metoda u kojoj se umjesto filma postavlja fluorescentni ekran naziva se metoda vizualnog prozračivanja, a metoda prozračivanja na film naziva se foto metoda.
- Za industrijska ispitivanja koriste se uglavnom fotografske metode.
- Osnova fotografske metode određivanja grešaka sastoji se u dobivanju slike prozračenog komada u obliku filma ili fotografije.

Zahvaljujući nizu prednosti u odnosu na druge metode (dovoljno velika osjetljivost, mogućnost arhiviranja) fotografska metoda je našla široku primjenu u praksi prozračivanja. .

Principijelna shema metode dana je na slici 8.8.



- Slika 8.8: Shema prozračivanja materijala x zrakama

- Svaka nehomogenost u materijalu (pukotine, pore, uključci.) pokazuju se na filmu kao različito zacrnjenje.
- Kvaliteta snimka (dobar kontrast) ovisi o:
 - jačini (intenzitetu) rendgenskih zraka
 - fokusnog rastojanja
 - veličini sekundarnog zračenja
 - naknadnoj obradbi filma
- Naknadna obradba se sastoji od razvijanja, fiksiranja i sušenja filma. Nakon toga se analizira snimak.

Mjerna oprema:

- klasični rendgenski aparati
- visokonaponski rendgenski aparati
- Betatron.

8.2.2. Gamografija - Ispitivanje s radioaktivnim izotopima

- U svrhu industrijske defektoskopije radioaktivno zračenje koristi se još od 1928. U prvo vrijeme isključivo je korišten prirodni izotop radija. Zbog visoke cijene nije našao široku primjenu u industriji. Masovna proizvodnja umjetnih radioaktivnih izotopa dobivenih u reaktorima, ciklotronima, akceleratorima omogućila je širu primjenu izotopa tek od 1960.
- Umjetni radioaktivni izotopi danas se mogu proizvesti u različitim standardnim dimenzijama i aktivitetima, sukladno uređajima na kojima se provodi ispitivanje- (DEFEKTOSKOP).

- Uslijed malih valnih duljina radioaktivne gama zrake imaju svojstvo da prodiru kroz sve materijale.
- Prozračivanjem, propuštanje gama zraka kroz različite materijale je različito.
- **Materijali s malom atomskom masom vrlo dobro propuštaju gama zrake dok ih materijali s velikom atomskom masom znatno apsorbiraju.**
- Osjetljivost radiograma određuje se veličinom najmanje greške koja se može identificirati.
- Da bi se dobio što kontrasniji film iza filma koji se postavlja u gumene ili plastične kasete postavlja se olovna podloška kako bi se film zaštitio od sekundarnog zračenja koja nastaju kao posljedica rasijavanja gama zraka od okoline.

- Pocrnjenje negativa radiograma na mjestu snimanja ovisi o odnosu intenziteta u snopu zračenja poslije prolaza gama zraka kroz materijal, odnosno od njihove apsorpcije kroz materijal.
- Svaka nehomogenost u materijalu pojavljuje se na snimku kao različita gustoća pocrnjenja.
- Što je granica između pojedinih kontura defekata i osnovnog negativa na filmu oštija, tj. što je film više kontrastan, to je lakše razabrati nađene greške i suditi o njihovom obliku i veličini (kao i kod snimanja x zracima).

- Gamografska kontrola se može provoditi pojedinačnim ili panoramskim prozračivanjem uzoraka gama zracima.
- Panoramskim prozračivanjem uzoraka, pri čemu se izvor zračenja izbacuje iz defektoskopa tako da zrači pod kutom 2π . Na taj način je omogućeno istovremeno prozračivanje većeg broja uzoraka.

Pri izboru gama izvora treba voditi računa o:

- vrsti i debljini ispitivanog materijala.
- vremenu poluraspada radio izotopa
- raspoloživim aktivnostima i dimenzijama radioaktivnih izvora

Tablica 8.4: Osnovne karakteristike izotopa koji se mogu koristiti u industrijskoj gamografiji dane su u sljedećoj tablici

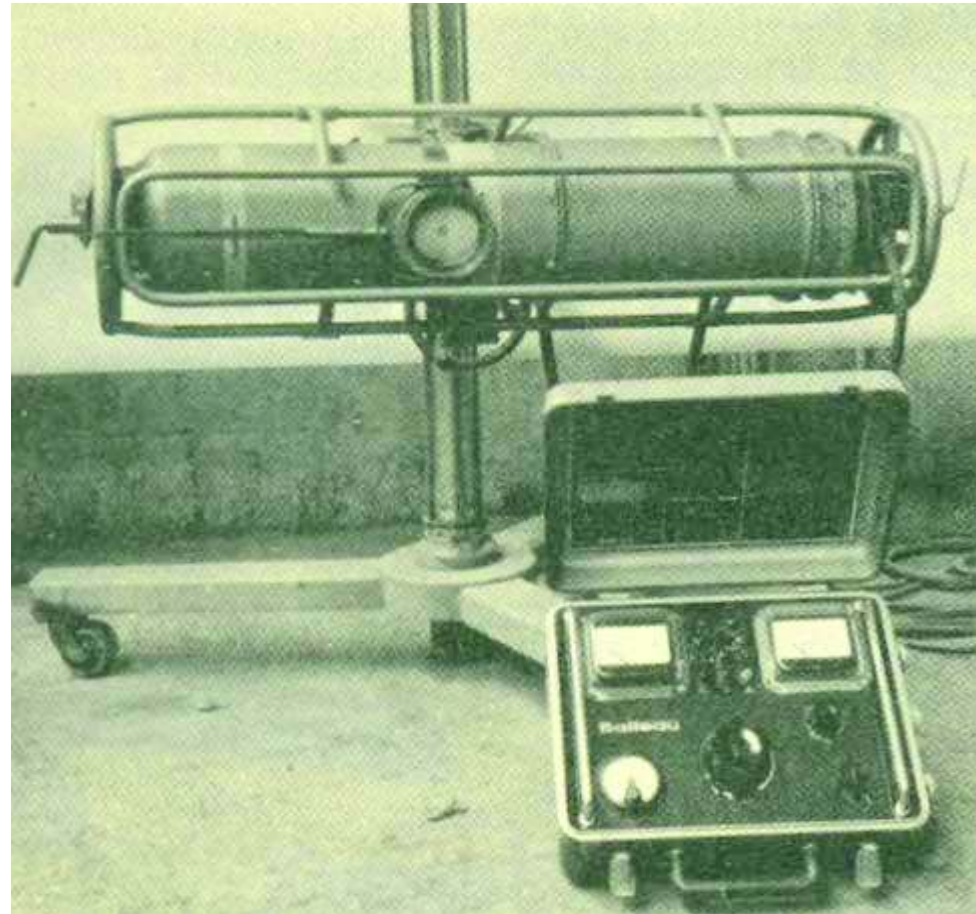
Red. broj	Vrsta izotopa	oznaka	Boja	Energija	Zračenja MeV	Period poluraspada	Jon. Const.	Veličina	Valna duljina
1	iridi	Ir 192	plava	0,67	0,296 0,613	74 dana	2,7	1x1 1x2 4x4	duga
2	tulij	Tm 170	zelena	0,968 0,884	0,084	129 dana	0,5	2x2 3x3	duga
3	tantal	Ta 182	crna	0,53	0.066 1,230	117 dana	6,5	2x2 4x4	kratka
4	kobalt	Co 60	crvena	0,306	1,171 1,331	5,2 god	13,50	2x2 4x4 6x6	kratka
5	cezij	Cs 137	žuta	0.51 1,20	0,607	33 god	3,50	2x2 4x4 6x6	sr- denja 350

Mjerna oprema

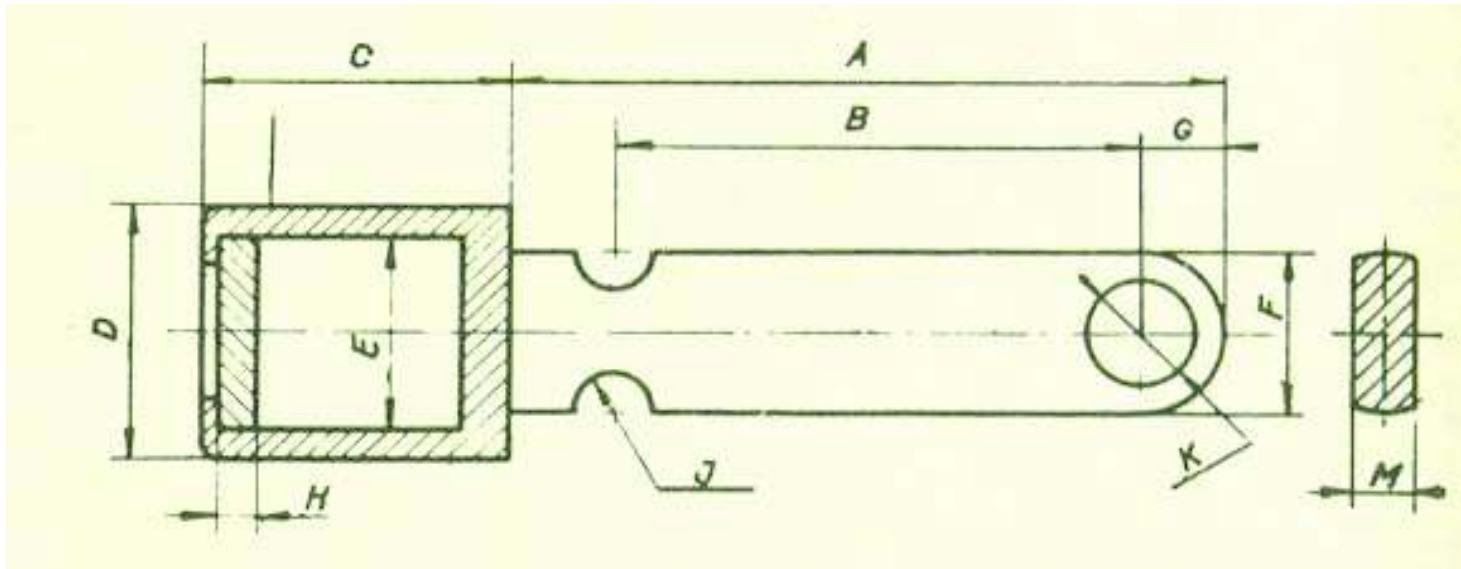
Ispitivanje se provodi uređajem defektoskopom.

Mjernu opremu obično čini

- defektoskop i
 - kontejner
- Defektoskopi su eksponažni uređaji za gamagrafiju.
 - Moraju zadovoljiti određene uvjete kako u pogledu zaštite onog ko rukuje s njime tako i u pogledu konstrukcije.



Slika 8.9: Defektoskop



Slika 8.10: Nosač izotopa

- U vrijeme ispitivanja radioaktivni izvor postavlja se u nosač u defektoskop
- Nakon ispitivanja radioaktivni izvor – izotop se sprema u kontejnere koji su posebno zaštićeni.

Prednosti u odnosu na rendgensko prozračivanje:

- Uređaji za ispitivanje (defektoskopi) lakši su i manje osjetljivi na način rukovanja i transporta, praktički je nepokvarljiv
- Rad s izotopima nije vezan za izvor električne energije, mjerne instrumente i transformatore
- Dimenzije gama radioaktivnog izvora su vrlo male tako da mogu prozračivati i vrlo uske i rendgenskoj cijevi nepristupačne objekte.
- S gama zračenjem moguće je prozračiti strojne dijelove i konstrukcije veće debljine nego s x zračenjem

Nedostaci primjene radioaktivnih izotopa su:

- kontrasti na gama radiogramu nešto su slabiji nego na rendgenogramu
- radio izotop stalno zrači i predstavlja opasnost za okolinu
- kod radioaktivnih izotopa prilično je dugo zbog čega operater mora biti duže izložen zračenju
- treba imati nekoliko izvora da bi se u danom trenutku izabrao izotop najpogodnije energije gama zračenja.

Primjena x i γ zraka u kontroli metalnih materijala

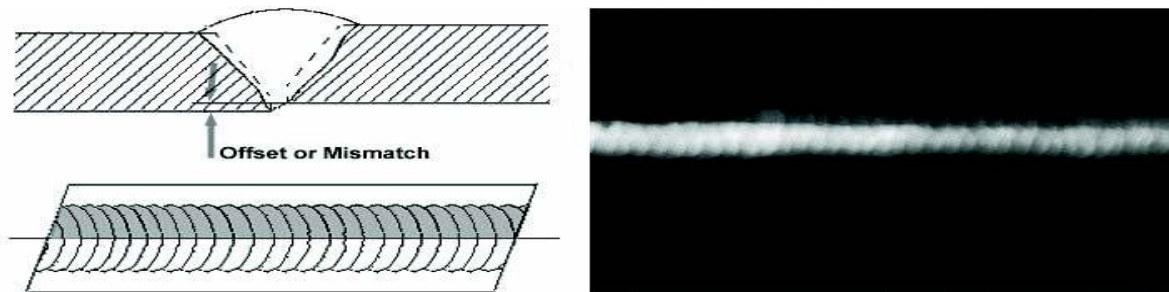
- X i γ zrake su našle široku primjenu kod prozračivanja
 - odljevaka
 - zavarenih spojeva
 - panoramskog prozračivanja

Prozračivanje odljevaka

- Odljevci se prozračuju da bi se u njima otkrile unutarnje greške, poroznosti, pukotine, uključci, troska, pijesak.... Na ovaj način se s jedne strane kontrolira sam proizvod a s druge i tehnološki proces.

Prozračivanje zavarenih spojeva

- Ovom metodom brzo i sigurno se može ispitati kvaliteta zavarenog spoja.



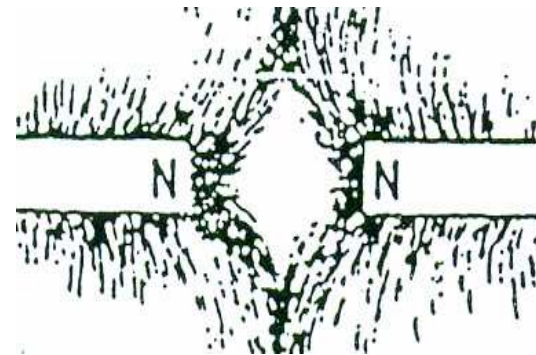
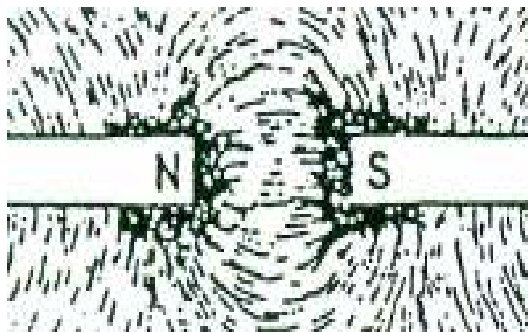
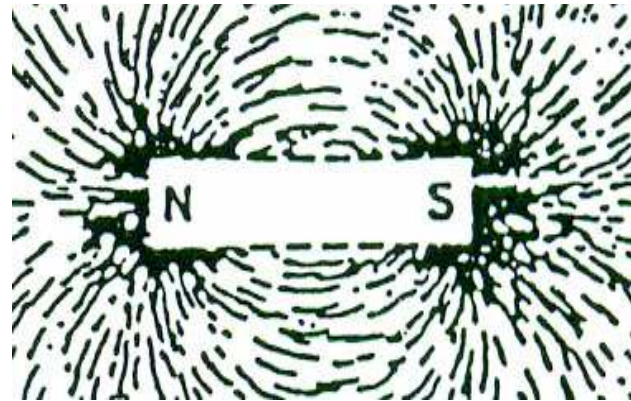
Panoramsko prozračivanje

- Gama zraci su naročito pogodni za istovremeno prozračivanje strojnih dijelova istih dimenzija (iste debljine) i iste gustoće panoramskim prozračivanjem.
- Deblji predmeti se stavljaju bliže ka izvoru a tanji dalje od izvora.

8.3. MAGNETNA ISPITIVANJA

Magnetsko polje

- Magnetsko polje je područje u kojem djeluju magnetske sile.
- Uobičajeni način prikazivanja smjera djelovanja magnetskog polja je povlačenje linija u smjeru djelovanja polja.
- Takve linije nazivaju se magnetske silnice i pokazuju smjer magnetske sile u svakoj točki prostora.
- Smjer silnica ukazuje na smjer magnetskog djelovanja, a gustoća silnica odražava jakost djelovanja magnetskog polja



- Slika 8.11: Tok magnetskih silnica u raznim slučajevima kombinacije magnetskih polova

Primjena magneta u ispitivanju metalnih materijala

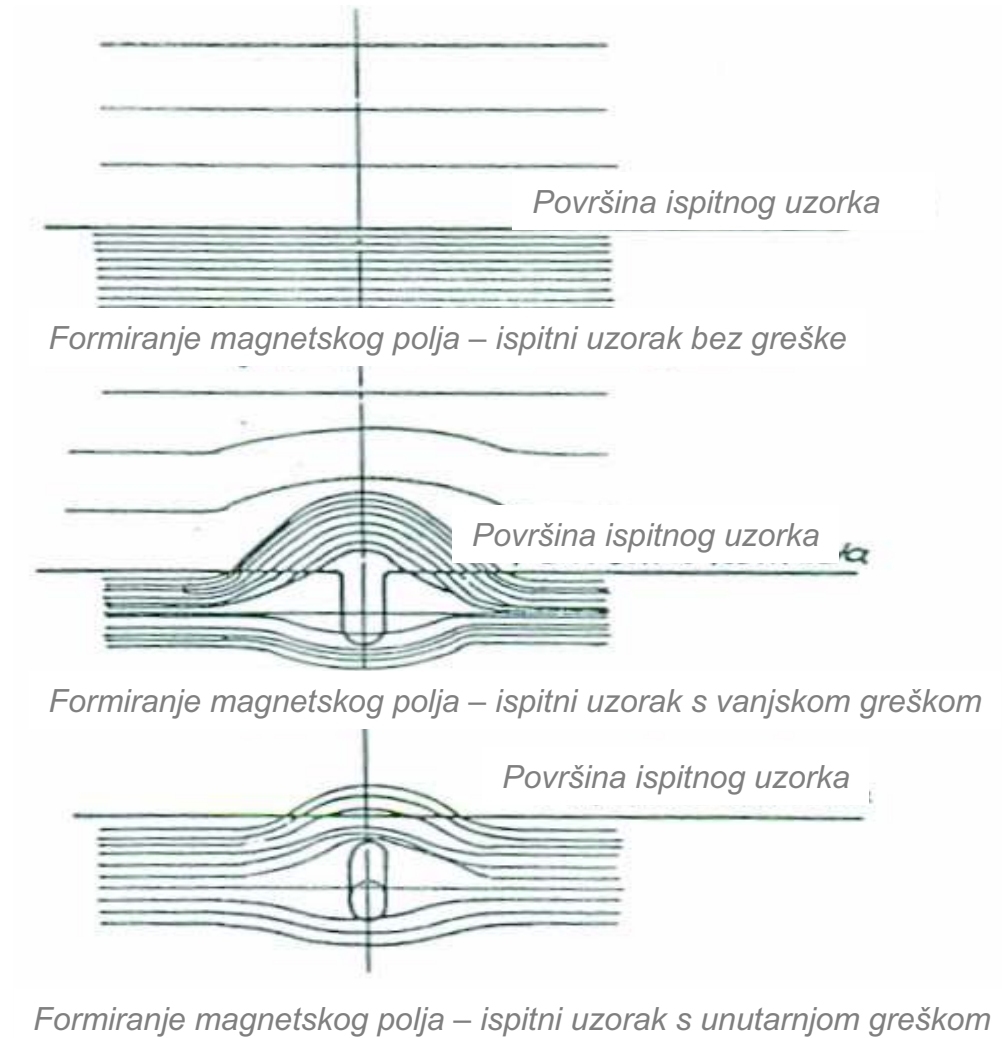
- Magnetna metoda ispitivanja je jedna od najefektivnijih metoda ispitivanja bez razaranja feromagnetnih materijala za otkrivanja površinskih i blizu površine smještenih diskontinuiteta u materijalu.
- 1922 Bayliju je patentirao magnetnu metodu nastavljajući radove:
- Saxbia (1868. – odredio je defekte u puščanoj cijevi pomoću kompasa) i
- Hookea, koji je otkrio da se pri obradbi metala u magnetskom polju sitna strugotina taloži na mjestu defekta u materijalu.

- Razvoj metode bio je nužna posljedica brzog razvitka u metalnoj industriji.
- Metodu je poboljšao Bauson tako što je predložio da se upotrijebi emulzija samljevenog oksida željeza u kerozinu.
- Već 1927. na ovakav način ispitivani su i veliki dijelovi, npr. rotor generatora.
- Kasnije je Armov izvršio poprečnu magnetizaciju pomoću električne struje, pri čemu je ispitivani strojni dio bio potopljen u indikatorsku tekućinu.

- Za potrebe magnetske kontrole kvalitete metalnih dijelova primjenjuju se:
 - permanentni magnet
 - elektromagneti.
- Permanentni magnet najčešće nije dovoljno jak izvor potrebnog magnetizma.
- Postoje dva načina proizvodnje magnetskog polja:
 - gibanjem električnog naboja
 - vremenski promjenljivim električnim poljem

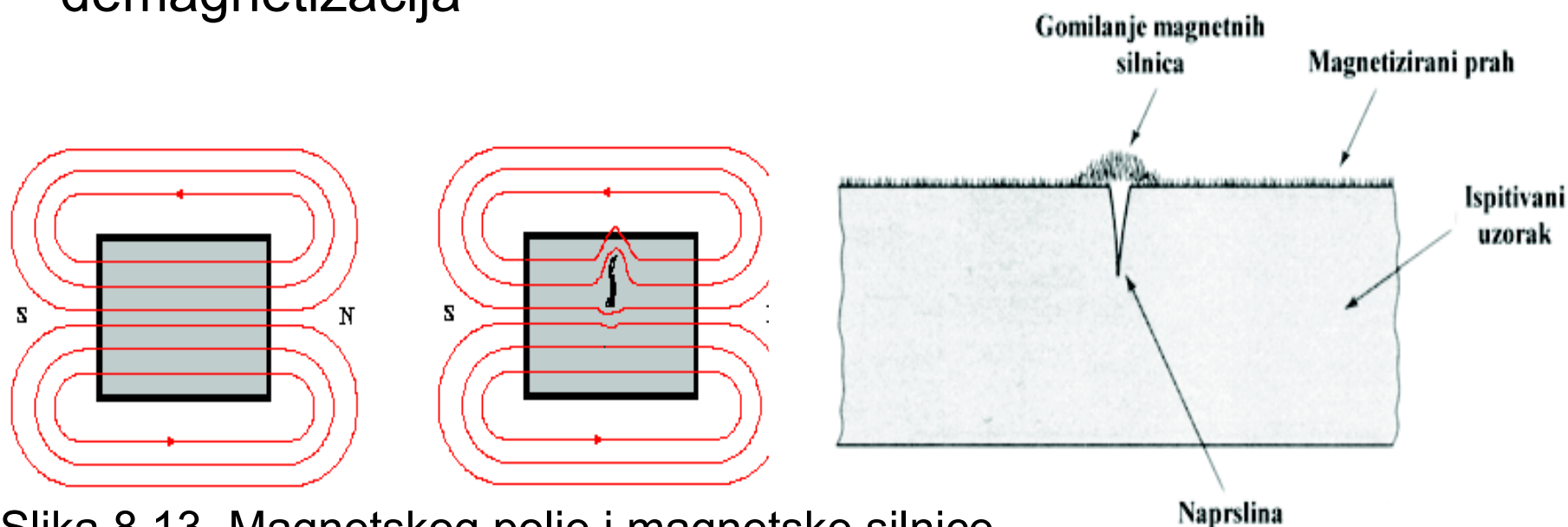
- Metoda određivanja grešaka magnetskim česticama u feromagnetnim materijalima temelji se na magnetiziranju okoline ispitivanja stalnim magnetom ili puštanjem struje koja stvara magnetsko polje.
- Ovom se metodom otkrivaju vrlo uski diskontinuiteti na površini i unutarnji diskontinuiteti blizu površine.
- Greške kao tanke površinske pukotine plinski mjehuri i uključci pod površinom, kao i lanci poroznosti blizu ispod površine (npr. u varu), prekidaju tok magnetskih silnica i otklanjaju ih.

- Na slici 8.12 je dan prikaz magnetskih silnica u jednakom uzorku s različitim greškama.



Slika 8.12. Formiranje magnetskog polja magnetske silnice

- Princip metode se može sažeti u pet temeljnih koraka:
 - priprema ispitivanog uzorka
 - uvođenje odgovarajućeg magnetskog polja u ispitivani uzorak
 - registracija izlaznog magnetskog polja uslijed prisutnosti greške formiranjem mjerljive indikacije greške
 - interpretacija indikacije i mjerenje greške
 - demagnetizacija



Slika 8.13. Magnetskog polje i magnetske silnice

- Registriranje izlaznog magnetskog polja uslijed deformacije na grešci može se provesti na više načina.
- Način registracije greške određuje podmetodu.
- Najčešći način registracije greške je pomoću specijalno priređenih magnetskih čestica.
- Magnetske čestice privlače izlazno magnetsko polje iznad mjesta otkrivene greške.
- Nanošenje čestica treba provoditi takvom tehnikom da čestice zaostanu samo iznad greške i da pri tome bude osiguran zadovoljavajući kontrast uočavanja čestica koje tvore indikaciju greške.
- Nakon toga se mjesto osvijetli svjetlom propisane jačine i identificira greška

- **8.3.1. METODE MAGNETSKIH ISPITIVANJA:**
 - a) ▶ mokri način nanošenja čestica
 - ▶ suhi način nanošenja čestica
 - b) ▶ istosmjerna struja
 - ▶ izmjenična struja

8.3.1.1. Mokri način nanošenja čestica

- Komad se prska tekućom mješavinom magnetskih čestica s mineralnim uljem (ili se uroni u kupku s ovom mješavinom).
- Magnetske čestice koje su kombinirane s ovim uljem vrlo fino su raspršene.
- U mnogim slučajevima koriste se *fluorescentni* materijali kako bi se jače istakle silnice i čestice na mjestu greške.
- Potrebno je imati izvor svjetlosti iz dijela tamnog spektra koji je vrlo blizak valnim duljinama ultraljubičastog svjetla.
- Najbolji rezultati postižu se s izvorom svjetla valne duljine 365 nm

Mokri način nanošenja magnetskih čestica je pogodan za ispitivanje manjih uzoraka jer:

- a) neće doći do rasipanja praha
- b) ispitivani uzorci se uranjaju u kupku.

8.3.1.2. Suhi način nanošenja čestica

- Kod ovog načina preko dijela kojeg treba ispitati raspršuje se prah većeg zrna nego kod mokrog načina.
- Ovaj način je mnogo osjetljiviji za pronalaženje grešaka ispod površine.
- Suhi način upotrebljava se kod većine tipova prenosivih magnetskih uređaja za ispitivanje.
- Prah je obojen da bi se dobio bolji kontrast.
- Zbog maksimalne osjetljivosti na duboke greške ispod površine, naročito one u obliku pukotina, ova metoda se primjenjuje za ispitivanje zavarenih spojeva.

8.3.2. Magnetizacija

- Magnetizacija prirodnim magnetima
- Magnetizacija elektromagnetima
 - a) ► istosmjernom strujom
 - izmjeničnom strujom
 - b) ► kružna magnetizacija
 - uzdužna magnetizacija.

Magnetni prah

- Od kvalitete magnetnog praška i emulzije (prah+ tekućina) ovisi u velikoj mjeri i detekcija greške.
- Prah treba imati sljedeća svojstva:
 - a) magnetne osobine
 - b) veličina čestica
 - c) oblik čestica
 - d) tekućina za emulziju
 - e) sadržaj praha u emulziji
 - f) utjecaj magnetskog polja.

8.3.2.1. Magnetizacija prirodnim magnetima

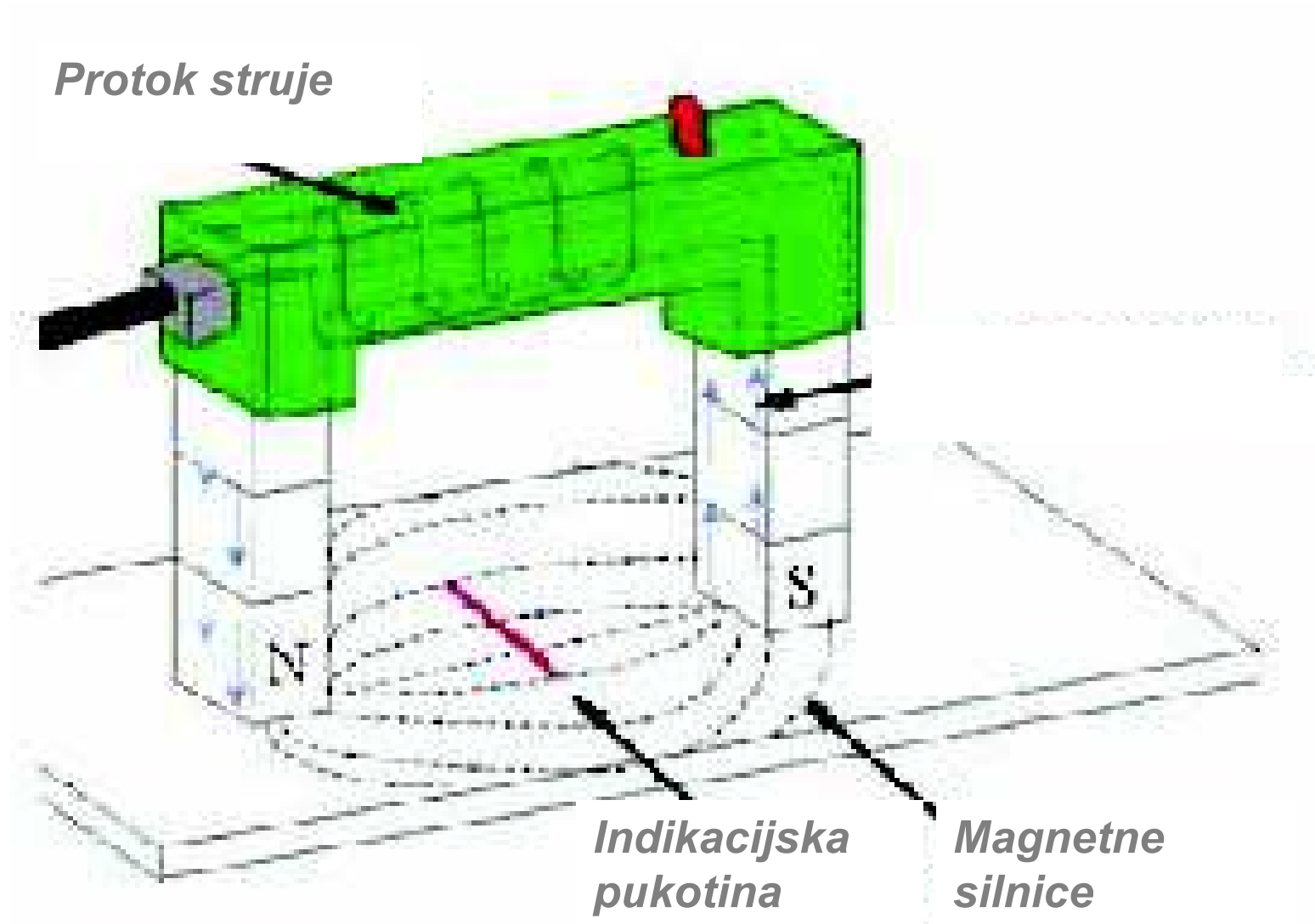
- Priključuju se oba magnetska pola prirodnog - stalnog magneta na dio ispitivanog uzorka ili objekta.
- Na tom dijelu objekta između polova stvara se magnetsko polje u kojem se otkrivaju greške pomoću magnetskih čestica.
- Veći objekti ispituju se tako da se jaram premješta svaki put za duljinu razmaka polova.

8.3.2.2. Magnetizacija elektromagnetima

- Magnetizacija objekta elektromagnetom može biti kružna ili uzdužna.
- Uzdužna magnetizacija sastoji se u tome da kroz komad prolazi magnetno polje stvoreno izvana.
- Kružna magnetizacija je ona u kojoj su silnice prolaskom struje formirane u unutrašnjosti samoga komada. Silnice formiraju zatvorene krugove bez formiranja polova.

8.3.2.3. Neizravna magnetizacija

- Elektromagnetsko polje stvara se na ispitivanom uzorku preko dvije elektrode.
- Elektrode ograničavaju područje koje se ispituje.
- Upotrebljavaju se niži naponi zbog:
 - lošijeg kontakta na krajevima elektroda (može nastati luk popraćen lokalnim predgrijavanjem).
 - kad elektroda slučajno sklizne s ispitivane površine može se oštetiti i ozlijediti operatera.



Slika 8.14. Neizravna magnetizacija



Lampa



Magnetna potkova

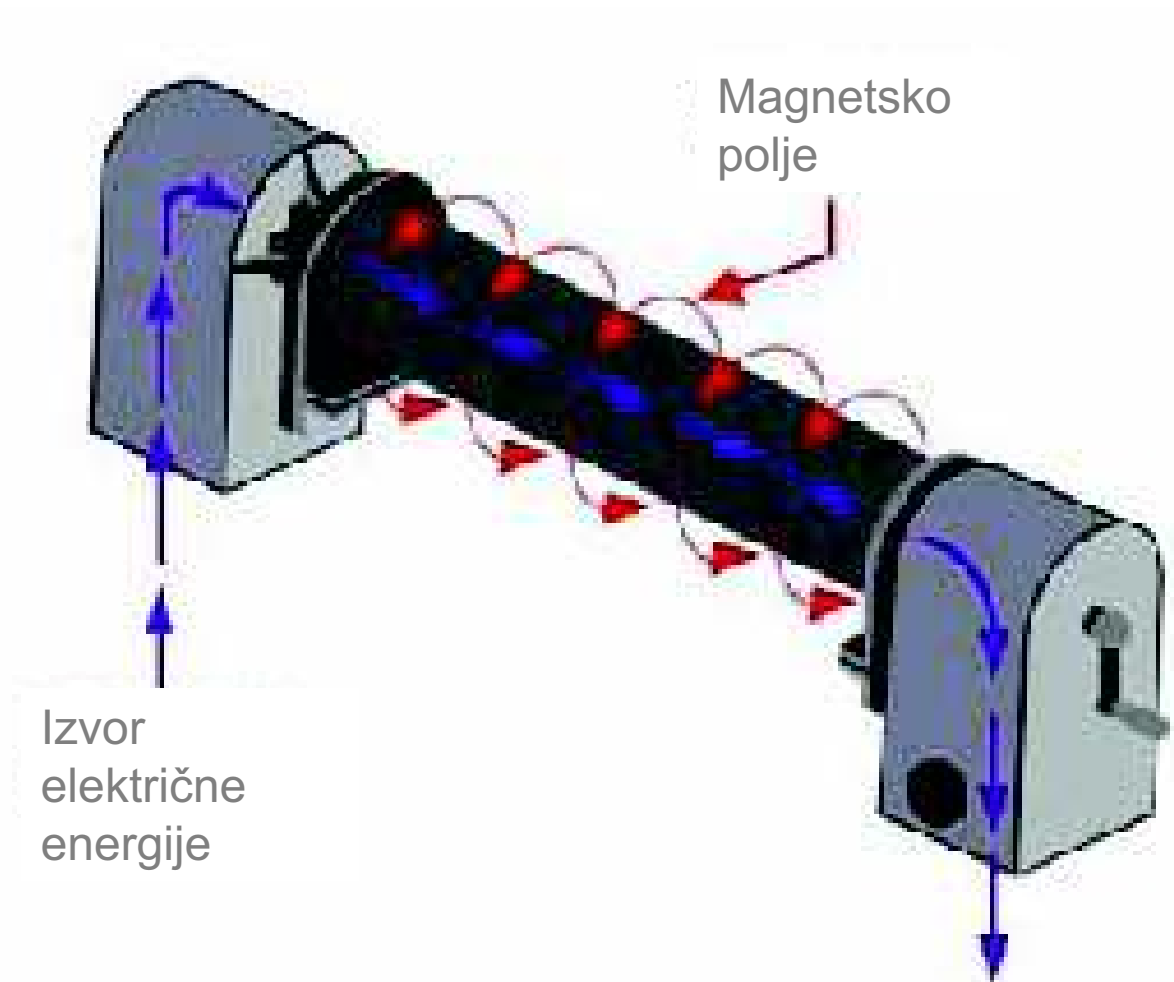


Ispitivanje čelične ploče

Slika 8.15. Ispitivanje magnetskim prahom

8.3.2.4. Magnetizacija izravnim prolaskom struje

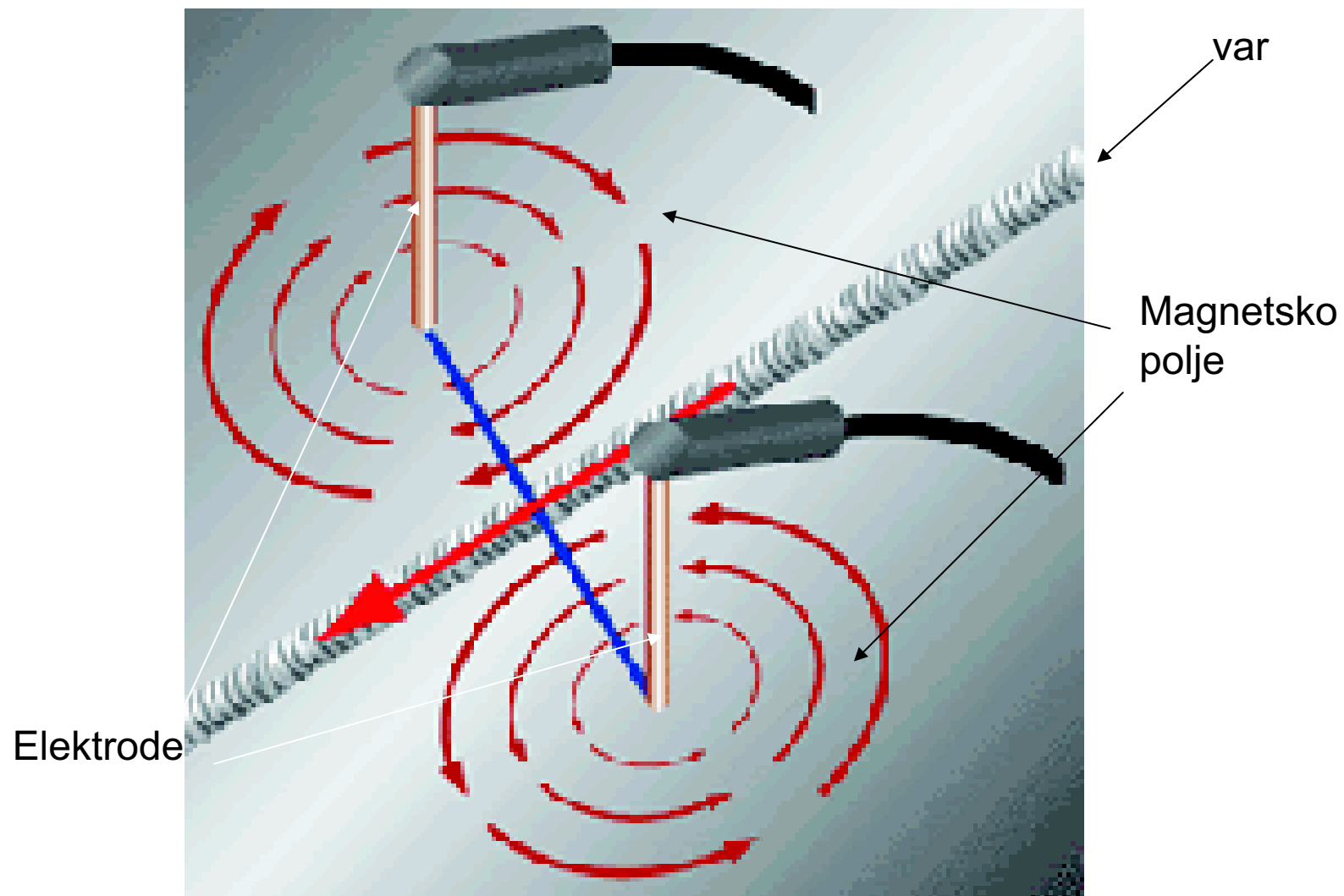
- Magnetizacija izravnim prolaskom struje provodi se tako da se na ispitni uzorak dovede struja. Prolaskom struje kroz uzorak stvara se magnetsko polje. Defekti koji su okomiti na silnice biti će najjasnije vidljivi, dok će greške pod kutom biti nešto manje vidljive (ovisno o kutu), a greške u smjeru silnica neće biti vidljive.
- Ova metoda pogodna je za ispitivanje dugih komada (cijevi, dugi profili, šipke,..) i zbog masovnog ispitivanja uređaji su stacionarni.



Slika 8.16. Izravna magnetizacija

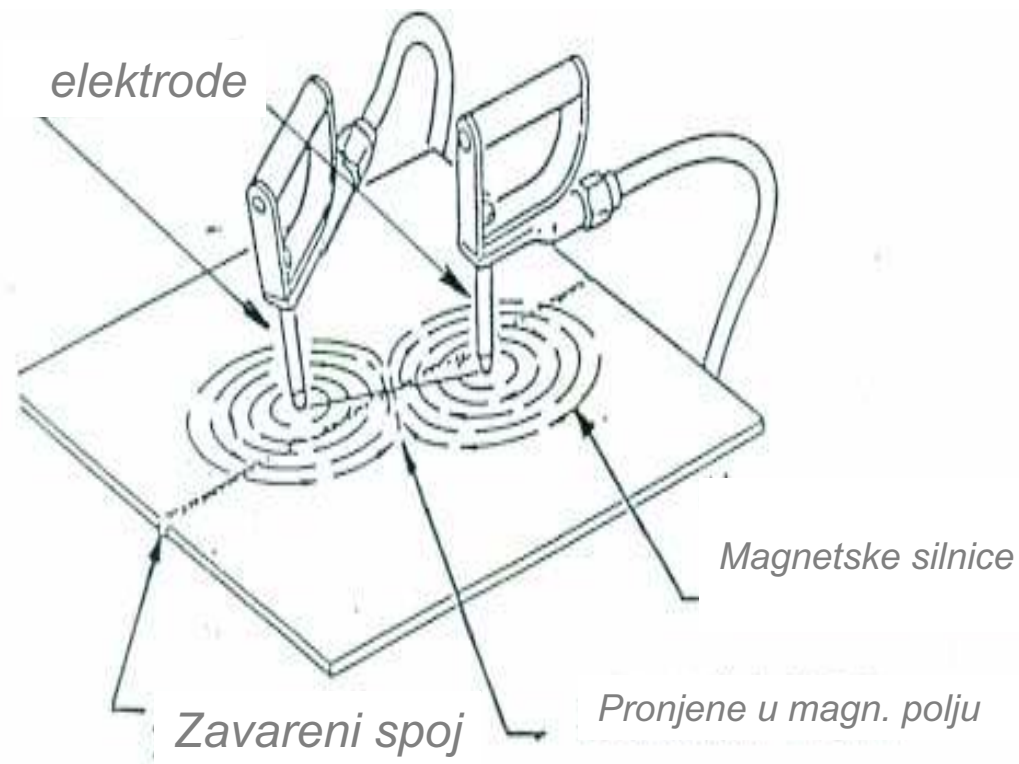
8.3.2.4.1. Kružna magnetizacija

- Kružna magnetizacija je ona u kojoj su silnice formirane u unutrašnjosti samoga komada prolaskom struje. Silnice formiraju zatvorene krugove bez formiranja polova.
- Za kružnu magnetizaciju upotrebljavaju se elektrode u obliku šipke preko kojih prolazi električna struja kroz njima ograničenu površinu ispitivanog uzorka. Na taj način stvara se elektromagnetsko polje. Struja se može dovoditi preko elektroda ili izravno na komad.



Slika 8.17. Kružna magnetizacija

- Prolaskom struje s jedne na drugu elektrodu ne formira se magnetski tok konstantnog presjeka već se stvara magnetsko polje koje u sredini razmaka elektroda dostiže maksimalnu širinu.

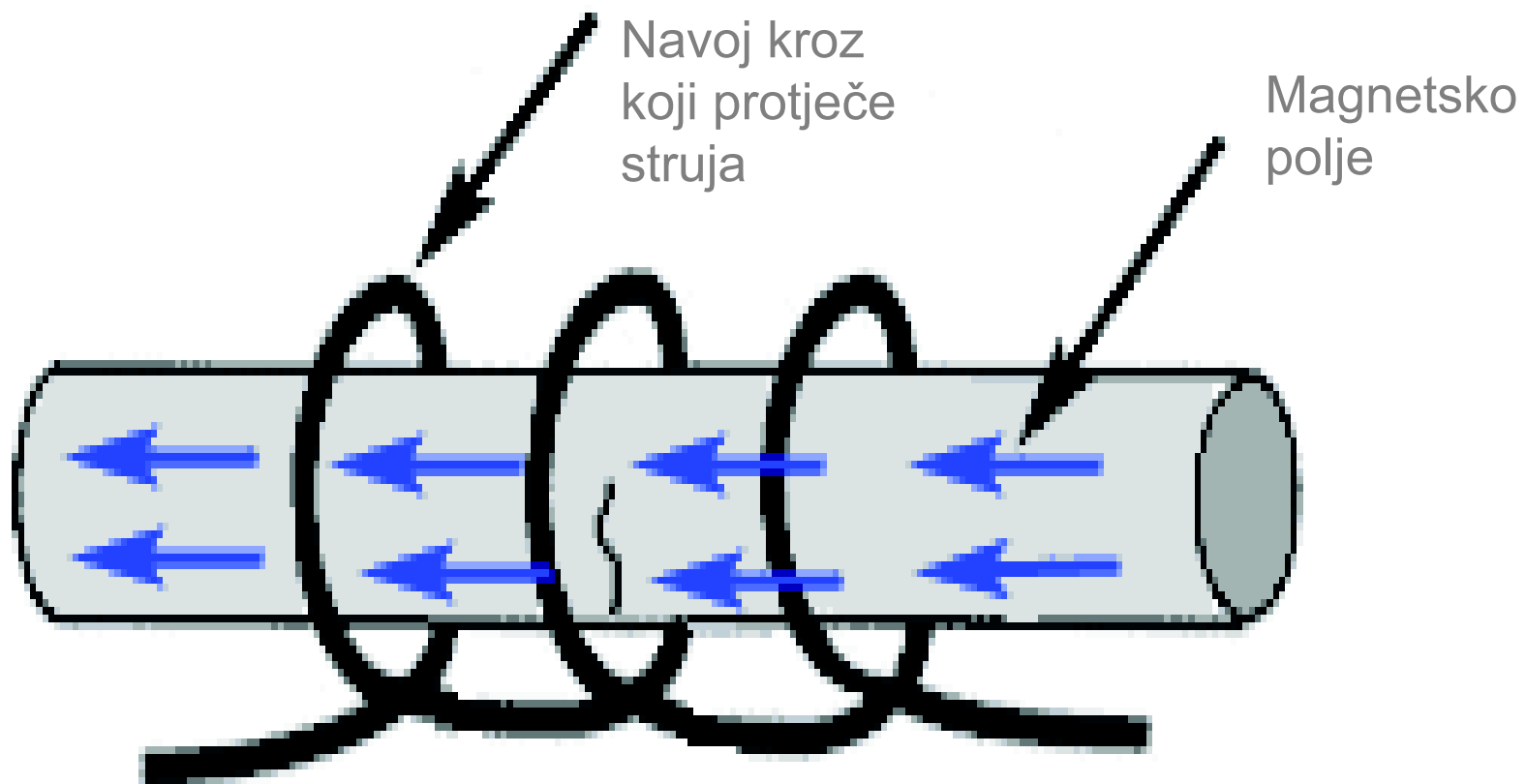


Slika 8.18. Magnetsko polje elektrodnog magnetoskopa

- Na tom proširenju je najmanja gustoća silnica.
- Zbog toga se mora voditi računa o razmaku elektroda.

8.3.2.4.1. Uzdužna magnetizacija

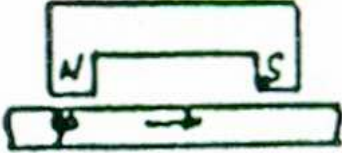
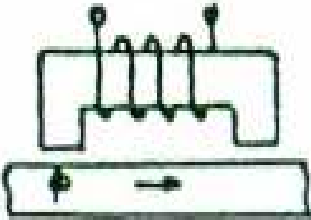
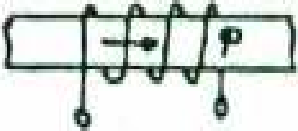
- Ispitivanje se provodi tako da se ispitivani uzorak uvodi u namotaj kroz koji prolazi istosmjerna ili izmjenična struja.
- Otkrivanje grešaka otežano je stvaranjem polja otklona magnetskih silnica izvan namotaja.
- Dugi komadi se ispituju tako da se namotaj pomiče uzduž ispitivanog uzorka.



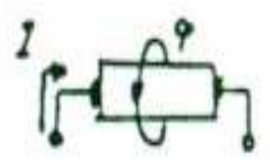
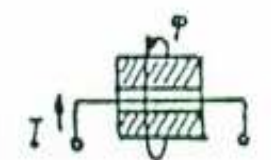
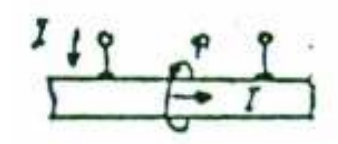
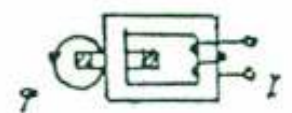
Slika 8.19: Uzdužna magnetizacija

- Za magnetizaciju se upotrebljavaju istosmjerna i izmjenična struja.
- Za pronalaženje diskontinuiteta ispod površine u odljevcima i varovima uobičajeno se upotrebljava istosmjerna struja, a za ispitivanje fino obrađenih strojnih dijelova izmjenična struja.

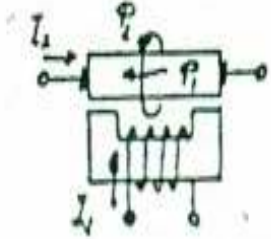
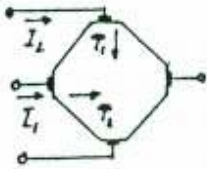
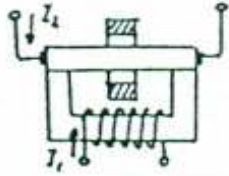
Tablica 8.5: Osnovne sheme magnetizacije

Vrsta magnetizacije	Način magnetizacije	Struja magnetizacije	Shema magnetizacije
Uzdužna	Magnet	<ul style="list-style-type: none"> - Istosmjerna - Izmjenična - Poluvalno ispravljena - Impulsna 	
	Elektromagnet		
	Zavojnica		

Tablica 8.6: Osnovne sheme magnetizacije

Vrsta magnetizacije	Način magnetizacije	Struja magnetizacije	Shema magnetizacije
Cirkularna	Strujom kroz objekt ispitivanja	<ul style="list-style-type: none"> - Istosmjerna - Izmjenična - Poluvalno ispravljena - Impulsna 	
	Strujom kroz centralni vodič		
	Strujom kontaktno		
	Induciranjem toka		

Tablica 8.7: Osnovne sheme magnetizacije

Vrsta magnetizacije	Način magnetizacije	Struja magnetizacije	Shema magnetizacije
Kombinirana	Strujom kroz objekt ispitivanja i elektromagnet	Kombinacije: - Istosmjerna - Izmjenična - Poluvalno ispravljena - Impulsna	
	Strujom kroz objekt u dva okomita smjera		
	Induciranjem toka i strujom kroz vodič		

8.3.3. Uređaji za magnetizaciju

- Uređaji za magnetizaciju
- mogu biti
 - stacionarni i
 - prijenosni

8.3.3.1. Stacionarni uređaji

- Upotrebljavaju se za ispitivanje manjih uzoraka ili strojnih dijelova ručno ili automatski. Najčešći je uređaj sa namotajem koji inducira u uzorku uzdužno magnetsko polje. Upotrebljavaju se uglavnom u masovnoj proizvodnji dugačkih proizvoda, cijevi, profila, šipke... Mogu biti izvedeni tako da se ispitivani proizvod uranja u emulziju s magnetskim česticama tijekom ispitivanja.

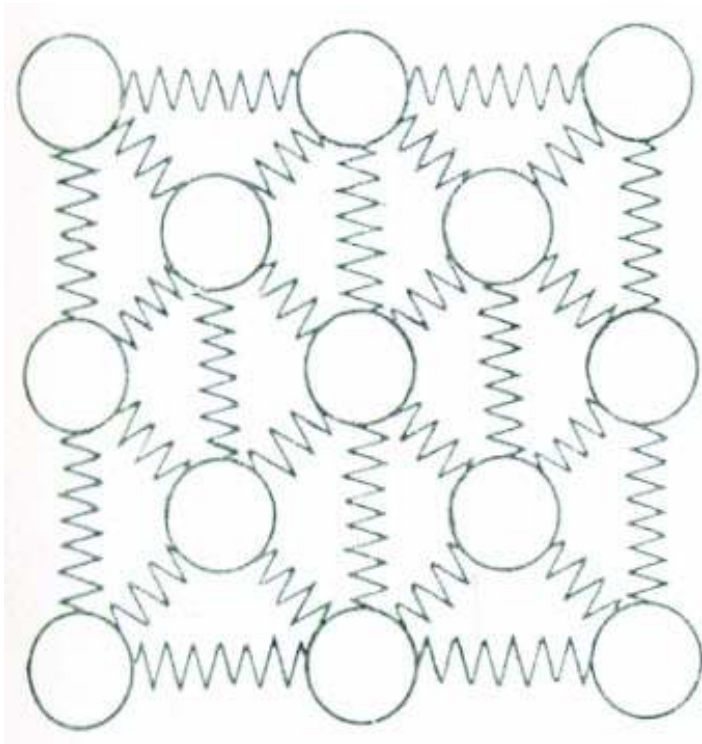
8.3.3.2. Prenosivi uređaji:

- upotrebljavaju se za ispitivanje većih dijelova i objekata u uporabi kao što su veliki odljevci, zavarene konstrukcije.
- upotrebljavaju se struje 300 do 6000 A, a naponi su između 4 i maksimalno 18 V.
- magnetizacija može biti djelomično pomoću elektroda i stvara kružno magnetsko polje.

8.4. ISPITIVANJE ULTRAZVUKOM

- Ultrazvuk je zvuk s višim frekvencijama nego čujni zvuk.
- Kod čujnog zvuka broj titraja je ispod 16000 titraja u sekundi, odnosno 16 KHz. ***To je granica zvuka i ultrazvuka.***
- ***Pod ultrazvukom podrazumijeva se mehaničko titranje s frekvencijom višom nego što je može čuti ljudsko uho.***
- Zvučni valovi se šire pravocrtno i natraške (reflektiraju).

- Shema gibanja zvuka dana je na slicu 8.20. Materija je sastavljena od mnogo malih čestica koje su međusobno povezane silama tako da se mogu gibati u svim pravcima oko prvobitnog položaja.



- Slika 8.20: Shema gibanja zvuka

- Pomakne li se iz ravnoteže jedan od tih djelića materije, on se počinje gibati i predaje energiju susjednim djelićima.
- Energija se u materiji prenosi preko pojedinih čestica te materije.
- Broj titraja čestica materije u određenom vremenu govori da li se radi o čujnom ili o nečujnom zvuku.

U prirodi postoje dva osnovna oblika valova:

- elektromagnetski
- elastični ili zvučni val .

- Osnovna razlika među njima je ta što za širenje elektromagnetskih valova nisu potrebne molekule - mediji, dok je za širenje zvučnih valova medij potreban.

- Čovjek registrira zvučne valove niskih frekvencija 16 do 16000 titraja u sekundi (Hz).

To je područje čujnog zvuka.

- Ispod i iznad ovog područja postoje titraji koji podliježu istim zakonima kao i čujni zvuk.

- Infrazvuk obuhvaća područje vrlo sporih, nečujnih titraja. To su seizmički valovi.
- Ultrazvuk počinje na gornjoj granici čujnog zvuka, iznad 16 000 Hz, do 10^{10} Hz.
- Iznad 10^{10} Hz su titraji koji odgovaraju toplinskom titraju molekula u čvrstom tijelu.
- **Kako je već rečeno elastični valovi u svim područjima su fizički ekvivalentni i razlika je u tome da li su čujni ili ne.**

Elastični titraji

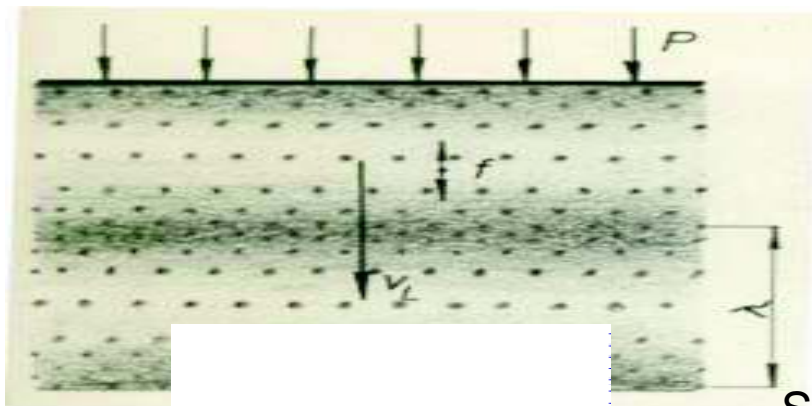
- **Promjena stanja koje se periodički mijenja naziva se titrajem.**
- Pri mehaničkom titraju, materijalna čestica ili grupa takvih čestica periodički titra oko ravnotežnog položaja. U ravnoteži ih drže molekularne sile.
- U akustici se sreću mehaničko-elastični titraji gotovo isključivo takvog tipa
- Broj titraja u jednoj sekundi naziva se frekvencijom, **1 titraj u jednoj sekundi je 1 Hz (herc).**
- Proces titranja je funkcija vremena i može se opisati različitim formulama.
- Tako se u čujnom području razlikuju titraji sinusnog tipa – to su čisti tonovi, i oni koji nisu sinusnog tipa – šumovi.

8.4.1. Zvučni valovi

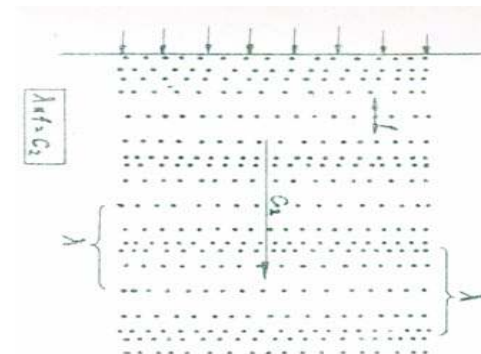
- Ukoliko se u elastičnoj sredini nalazi izvor titranja, ta se titranja prenose na susjedne čestice na određeni način i u određenom pravcu.
- Ti mehanički valovi mogu biti :
 - a) longitudinalni
 - b) transverzalni.

8.4.1.1. Longitudinalni valovi

- Longitudinalni valovi nastaju ako se pokrenu čestice sa površine, a pravac kretanja čestica je okomit na površinu.



Physics/wavepropagation.htm (1 of 2) [21.1.2009 17:16:15]



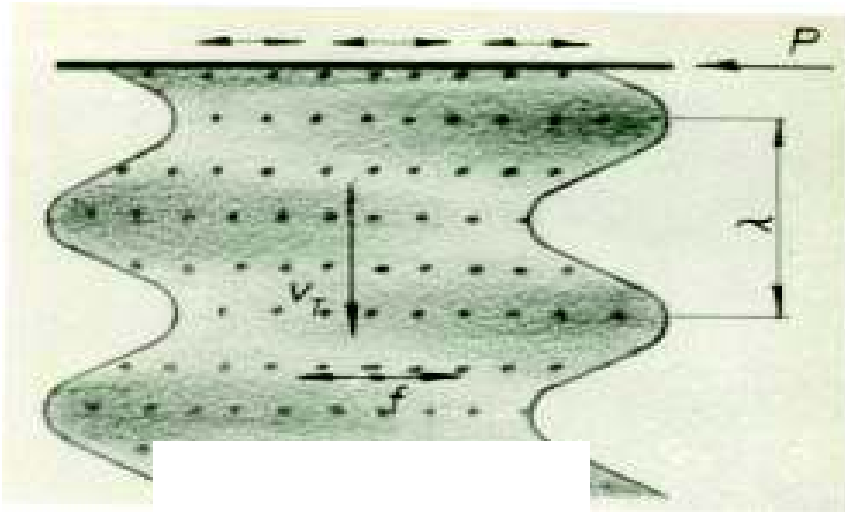
Slika 8.21. Longitudinalni valovi

Brzina je konstantna za određeni materijal i iznosi:

čelik	5 900 m/s
voda	1 480 m/s
zrak	330 m/s
aluminij	6 300 m/s

8.4.1.2. Transverzalni valovi

- Transverzalni val nastaje ako se čestice sa površine iz ravnotežnog položaja pokrenu u smjeru površine.



Slika 8.22. Transverzalni valovi

Brzina transverzalnog vala je

- čelik 3 230 m/s
- voda 0 m/s
- zrak 0 m/s
- aluminij 3 130 m/s

- Plohe pokrenutih čestica ostaju uvijek u jednakim razmacima.
- Valovi se kroz materijalni medij gibaju u konstantnim razmacima , odnosno konstantnom duljinom transverzalnog vala.

- Svaki zvučni val opisan je brzinom, v , valnom duljinom λ i frekvencijom, f .
- Sve tri veličine su u međusobno povezane:

$$\lambda \cdot f = v$$

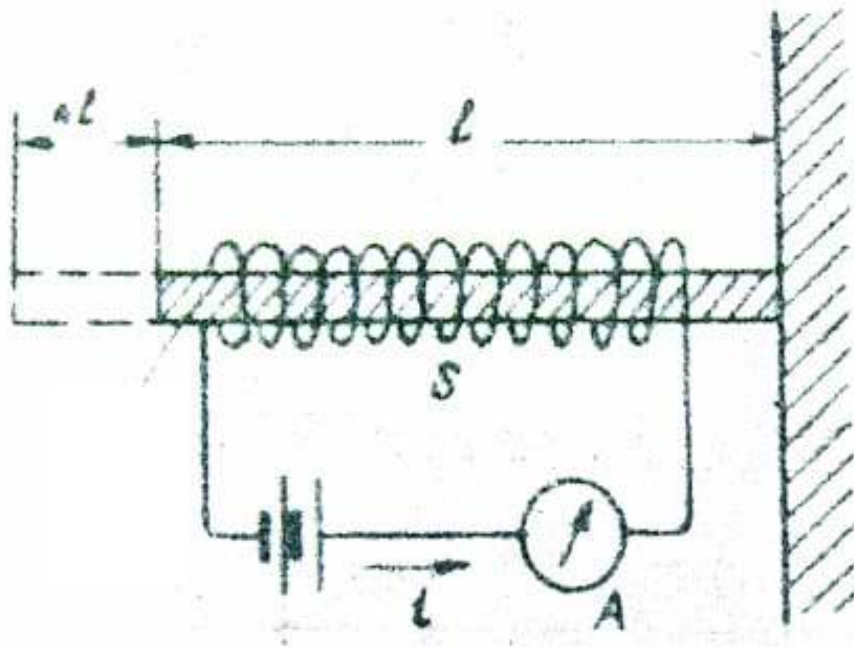
- Osim u obliku vala, postoji još jedna bitna razlika između longitudinalnih i transverzalnih valova:
- Kod longitudinalnih valova čestice titraju u pravcu širenja vala a kod transverzalnih valova čestice titraju okomito na smjer širenja vala.

8.4.1.3. Kako nastaje zvučni val?

- Nastajanje zvučnih valova temelji se na dva principa:
 - **magnetostricijski i**
 - **piezoelektrični**
- Kod defektoskopskih ispitivanja metalnih materijala obično se koristi **piezoelektrični efekt**, dok se za dobivanje niskih frekvencija koristi magnetostripcijski efekt.

- **Magnetostrikcijski efekt**

- Joule je 1847. dokazao da feromagnetni materijali šipkasta oblika mijenjaju svoju veličinu (dužinu) pod djelovanjem magnetskog polja.

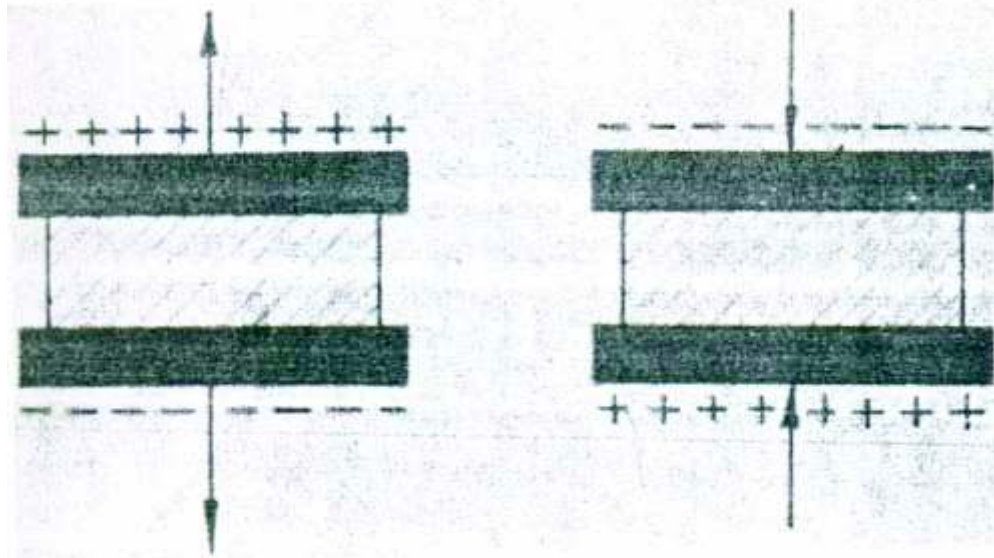


Slika 8.23. Magnetostrikcijski efekt

- Šipka iz feromagnetičnog materijala smještena je u solenoid.
- Duljina šipke prije uključivanja struje je l , a poslije $l + \Delta l$.
- Δl može biti pozitivna ili negativna.
- Produženje ili skraćenje šipke dano je odnosom $\Delta l / l$.
- Kako je ova vrijednost mala množi se s 10^6 .

Piezoelektrični efekt

- Ako se pločica kvarca sabije ili izduži u određenom smjeru na njenu kristalografsku os, ona će polarizirati, to jest na površini pločice stvoriti će se naboji, slika 8.24.



Slika 8.24: Piezoelektrični efekt

Predznak naboja ovisi o pravcu deformacije, a veličina od upotrijebljene sile. Obrnuta pojava javlja se kod istosmjernog električnog polja kad kvarcna pločica mijenja svoju veličinu.

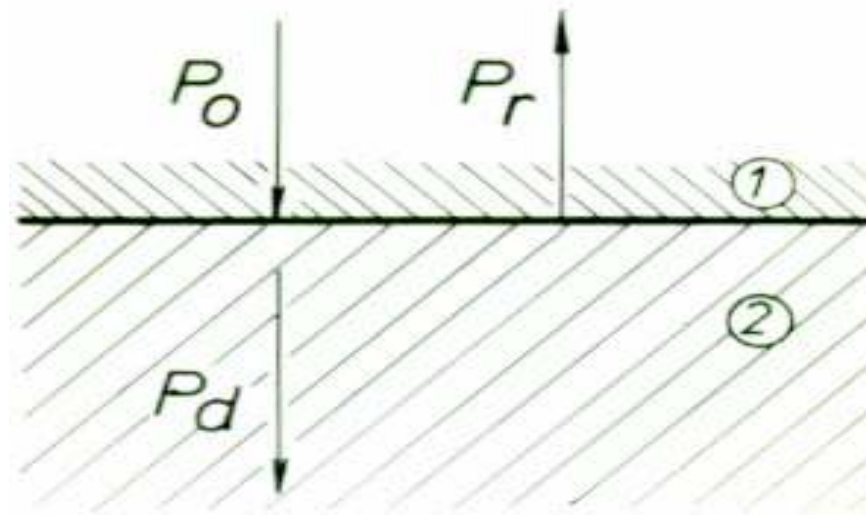
- Ako se umjesto istosmjerne struje dovede izmjeničnu, kvarcna pločica će vibrirati u ritmu frekvencije izmjeničnog napona.
- ***Ta pojava se naziva piezoelektrični efekt.***
- Pločica služi kao izvor električnih titraja.
- Ova pojava otkrivena je 1889.
- Kristal kvarca predstavlja heksagonalnu prizmu, kod koje je :
 - os z optička os kristala
 - os x električna os kristala i
 - os y mehanička os kristala.

8.4.2. Odbijanje i prelamanje ultrazvuka na granici dva medija

- Na granici dva medija dolazi do odbijanja i prelamanja ultrazvučnog impulsa. Treba razlikovati dva slučaja:
- Ultrazvučni valovi u ispitivani materijal mogu dolaziti okomito ili pod određenim kutom (koso).

8.4.2.1. Okomiti ulaz ultrazvučnog snopa u ispitivani materijal

- Pri okomitom ulazu ultrazvučnog snopa u ispitivani materijal, na granici dva medija dolazi do djelimičnog odbijanja ultrazvučnih valova.

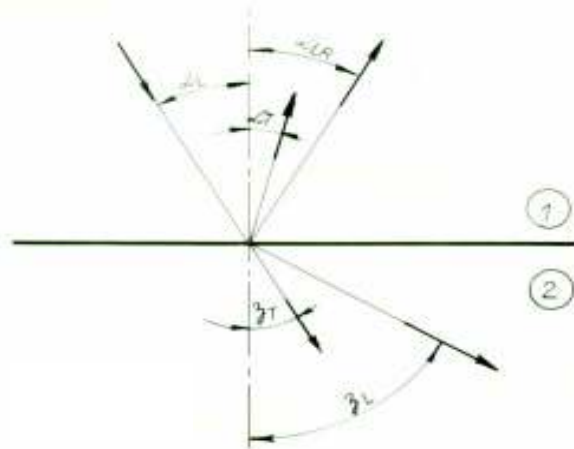


Slika 8.25: Okomiti ulaz ultrazvučnog snopa

- Ukoliko ultrazvučni val naiđe na veći defekt u materijalu, on ne prolazi kroz tu prepreku nego se odbija od nje.
- U slučaju da su ti defekti manji, dio ultrazvučnog vala će proći, a dio će se reflektirati.

8.4.2.2. Kosi ulaz ultrazvučnog snopa u ispitivani materijal

- Ako ultrazvučni snop u ispitivani materijal ulazi pod nekim kutom, na granici dva medija dolazi do transformacije vala.



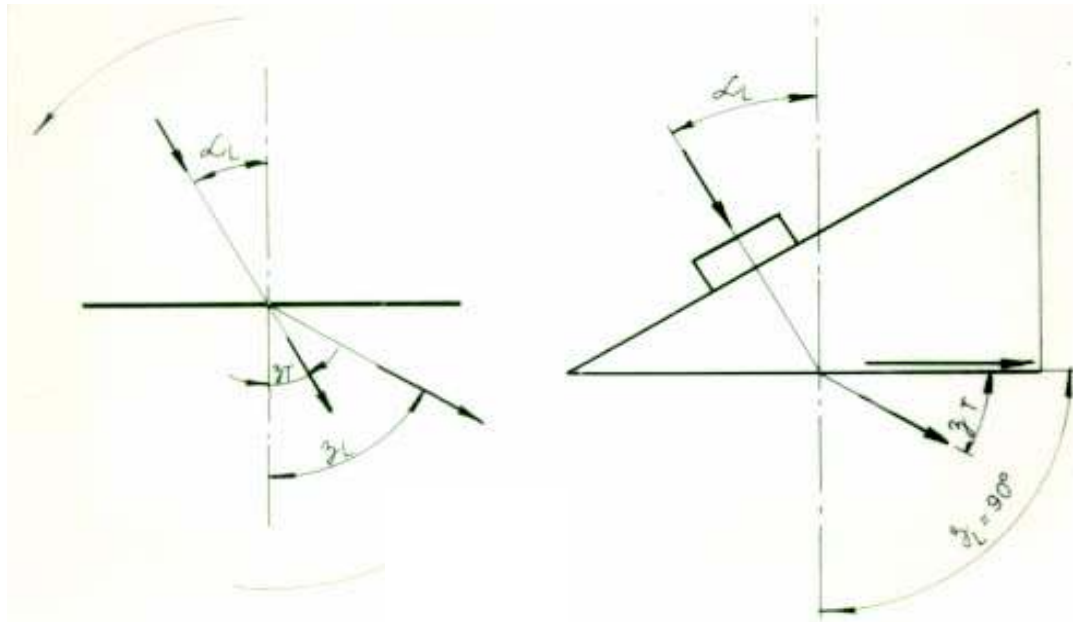
Pri tome nastaje više mogućnosti:

- oba vala mogu se odbiti
- jedan se odbija a drugi prelama
- oba se prelamaju.

Slika 8.26: Kosi ulaz ultrazvučnog snopa

U točki ulaska zvučnog snopa u ispitivani materijal nastaju i longitudinalni i transverzalni val koji se iz te točke šire neovisno jedan od drugoga.

Kako će se valovi odbiti, ovisi o upadnom kutu primarnog snopa kao i svojstvima medija na granici gdje se spajaju. Mijenjanjem ulaznog kuta α_L može se postići da se longitudinalna komponenta β_L u potpunosti ukloni i u materijalu se širi samo transverzalni val.



Slika 8.27: Eliminiranje longitudinalne komponente ultrazvučnog vala

- To je praktično iskorišteno za izradbu kutnog vibratora.
- Između ultrazvučnog vibratora i ispitivanog materijala postavlja se klin od elastičnog materijala pod određenim kutom.
- Tako se longitudinalni val odbija nazad u vibrator, a transverzalni val prodire u materijal pod kutom β_T .

Utvrđeno je da pod kutom

- 45° do 80° nastaju transverzalni valovi,
- 0° do 35° , longitudinalni valovi,
a u području
- 35° do 45° i longitudinalni i transverzalni valovi.

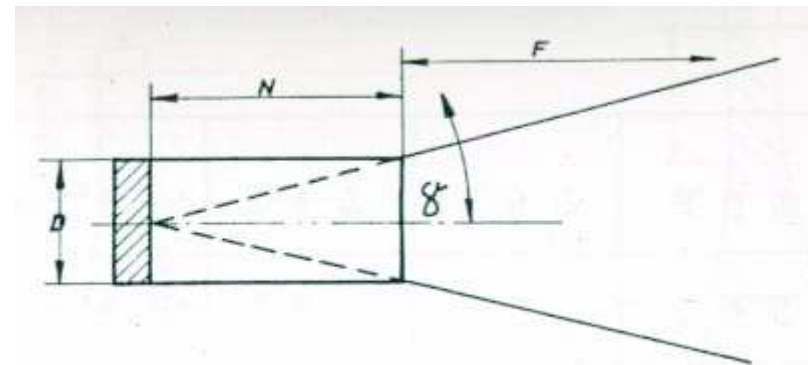
8.4.2.3. Geometrija zvučnog polja

- Snop ultrazvučnih valova koji se dovode na ispitivani materijal može biti:
 - uzak
 - širok

Kod ulaska uskog snopa ultrazvučnih valova u ispitivani uzorak energija se koncentrira u uskom području u dužini N (bliže područje).

Vibrator promjera D i frekvencije f šalje u ispitivani materijal brzinom zvuka v paralelni snop zvučne energije do udaljenosti N koja se naziva «bliže područje»

- Dalje energija divergira pod kutom γ i to područje se naziva «udaljeno područje».
- Kad imamo uski snop, on drži i na većim udaljenostima zvučnu energiju koncentriranu na uskom području.



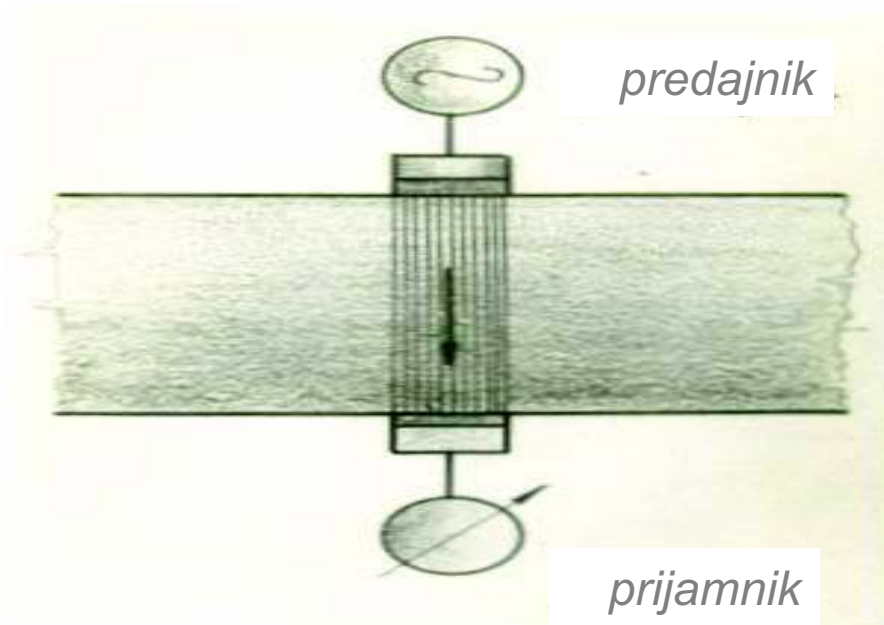
Slika 8.28: Polje snopa ultrazvučnih valova

8.4.3. Metode Ispitivanja

- Ultrazvučne metode ispitivanja baziraju se na osnovi tri osnovna principa:
 - a) prozvučavanju
 - b) odjeku
 - c) rezonanciji.

8.4.3.1. Metoda prozvučavanja

- Metoda prozvučavanja zasnovana je na principu apsorpcije ultrazvuka u unutrašnjim nehomogenostima u materijalu. Ona je analogna radiografiji.
- Osnova metode prikazana je na sljedećoj slici

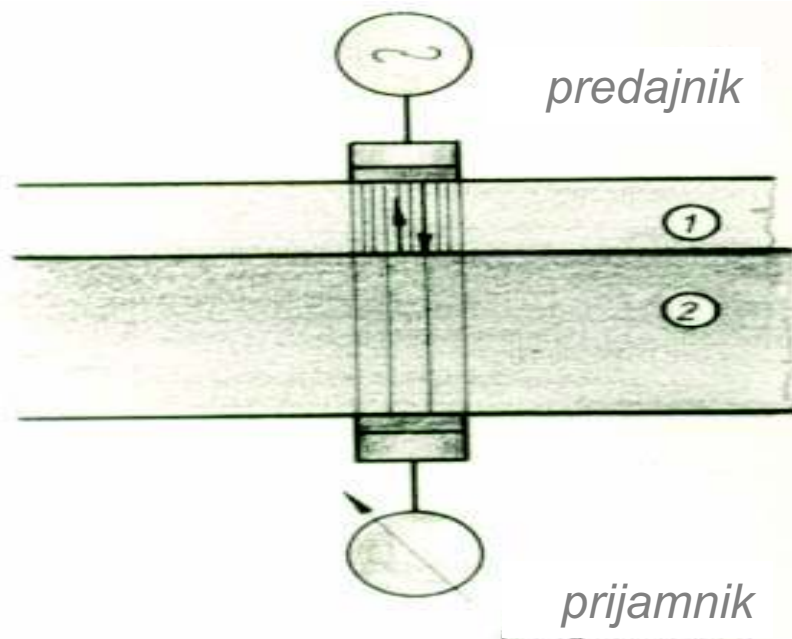


- Pomoću jedne ultrazvučne glave ultrazvučni valovi se usmjeravaju u ispitivani uzorak i na drugoj strani uzorka, drugom ultrazvučnom glavom se mjeri energija valova.

Slika 8.29: Prozvučavanje uzorka

Ako je uzorak homogen, bez defekata, signal na prijemniku biti će jednak ulaznom (100%).

- Ako se uzorak sastoji od dva različita materijala, onda će dio zvučne energije biti odbijen na granici ovih materijala.
- U tom slučaju prijemni instrument registrira signal manji od 100% od ulaza.
- Koliko manji ovisi o vrsti materijala, odnosno njegovu zvučnom otporu W .

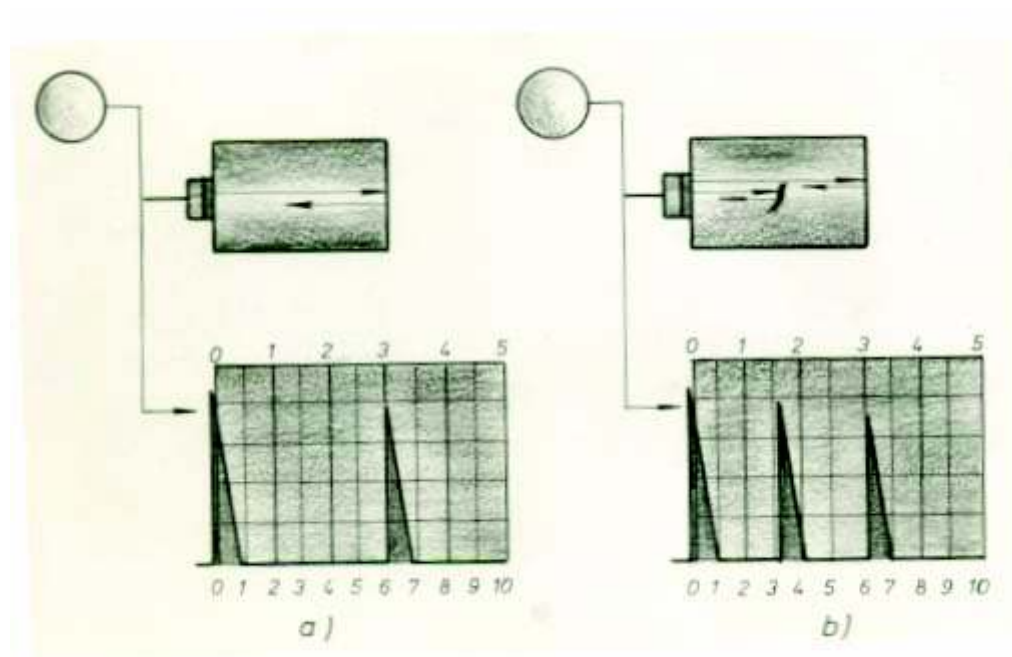


- Ova metoda može otkriti samo krupne defekte.
- Naročito je pogodna za otkrivanje slojevitih grešaka u tankim uzorcima, do debljine 50 mm.

Slika 8.30: Prozvučavanje uzorka od dva različita materijala

8.4.3.2. Metoda odjeka

- Temelji se na principu odbijanja ultrazvuka od različitih nehomogenosti u materijalu.



- Danas kod ove metode kao generator i prijamnik služi jedna ultrazvučna glava. Umjesto propuštenog dijela ultrazvučnog vala, mjeri se reflektirani.

Slika 8.31: Metoda odjeka

Prijamnik prima reflektirane ultrazvučne valove i pokazuje ih kao proporcionalni signal na ekranu ultrazvučnog aparata. ⁴¹³

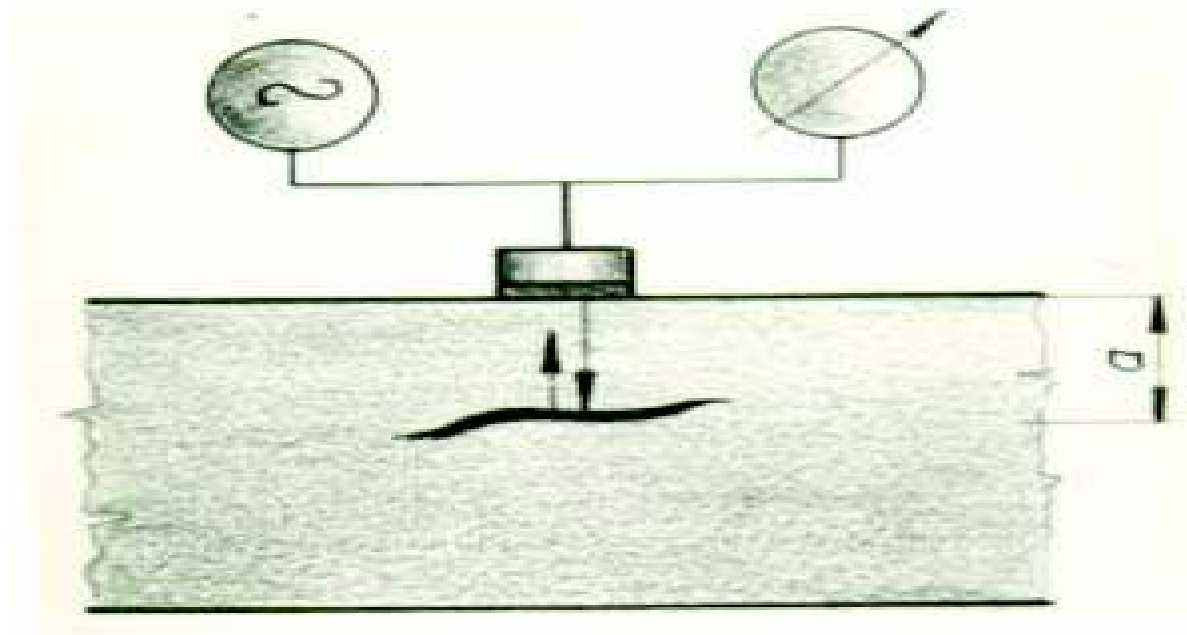
- Ovom metodom mogu se identificirati sljedeće greške:
- položaj i veličina raznih nehomogenosti u materijalu
- područje u materijalu koje nije dobro toplinski obrađeno
- kontrola zavarenih spojeva.

U usporedbi s metodom prozvučivanja ova metoda je osjetljivija.

- Smatra se da se samo 5% energije odbije zbog nehomogenosti u materijalu.

- Nedostatak ove metode je «mrtva zona».
- Na mjestu ulaska ultrazvuka u materijal emitirani impulsi ne mogu biti tako male dužine da odmah otkriju defekte u blizini ultrazvučnog vibratora (ultrazvučne glave)
- Korištenjem prigušivača ova zona se može znatno smanjiti i iznosi cca. 5 mm.

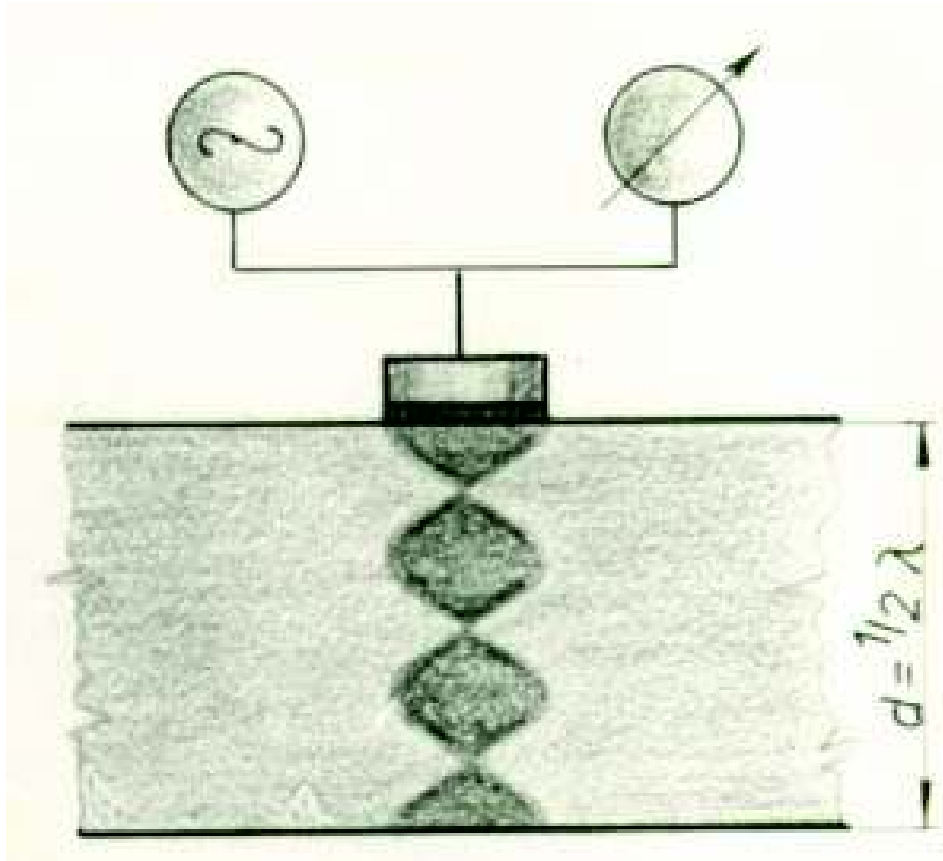
Ova metoda omogućuje određivanje lokacije defekta unutar materijala na način da se mjeri vrijeme putovanja ultrazvučnog impulsa do i od mjesta refleksije ultrazvučnih valova.



Slika 8.32: Određivanje lokacije defekta

Da bi se ova metoda mogla upotrijebiti, mora se imati mjerni instrument koji istovremeno pokazuje napon i vrijeme.

8.4.3.3. Metoda rezonancije



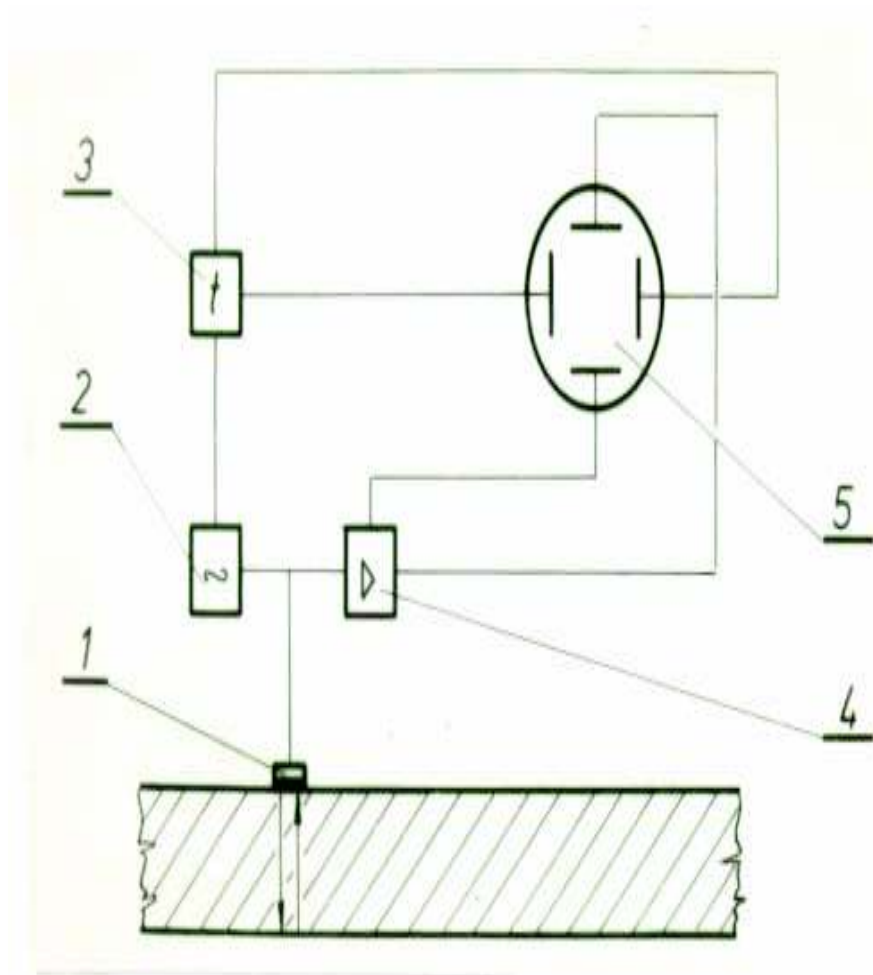
Slika 8.33: Metoda rezonancije

■ Ukoliko je debljina materijala jednaka zbroju polovina valne duljine, nastaje stojeći val, to jest postignuta je rezonancija. 417

- Ova metoda se temelji na principu stojećih valova. Ultrazvučni valovi se odbijaju od zadnje stjenke i vraćaju u prijemni vibrator pri čemu ti valovi interferiraju sa dolazećim.

8.4.4. Uređaji za ultrazvučna ispitivanja

- **Uređaji za ultrazvučna ispitivanja nazivaju se defektoskopi**
- **Čine ga:**
 - generator, koji daje kratke impulse za uzbuđivanje predajnog vibratora ultrazvučne glave
 - prijemnik i pojačalo za prijem i pojačanje signala od vibratora
 - vremenska baza, koja na temelju vremena prodiranja impulsa u materijal određuje dubinu defekta
 - sinkronizator, koji regulira vrijeme slanja impulsa
 - Katodni oscilograf, koji registrira odjek.



1. katodni oscilograf
- vibrator (ultrazvučna glava)
2. generator
3. vremenska baza
4. pojačivač
5. katodni osciloskop

Slika 8.34: Shema impulsnog defektoskopa

Ultrazvučne glave

- ***Ultrazvučna glava*** je složen akustični sklop.
- Sastoji se od *vibratora* koji usmjerava ultrazvučne valove u ispitivani materijal i *vibratora* koji registrira reflektirane ultrazvučne valove.
- Izbor ultrazvučne glave provodi se prema vrsti vibratora, promjeru vibratora i potrebnoj frekvenciji.
- Veći promjer vibratora daje veću osjetljivost jer je kut divergencije ultrazvučnog vala manji.

- Kod veće frekvencije postiže se bolja selektivnost metode (postiže se bolje raspoznavanje defekata).
- Frekvencije ultrazvučnih aparata kreću se od 0,5 do 12 MHz. Promjeri vibratora su od 5 do 34 mm, i dijele se prema veličini promjera, tablica 8.8.

Tablica 8.8: Podjela vibratora

Promjer vibratora, mm	Naziv	Oznaka
5	subminijaturni	SM Q2
10	minijaturni	M Q2
24	normalni	Q2
34	veliki	Q1

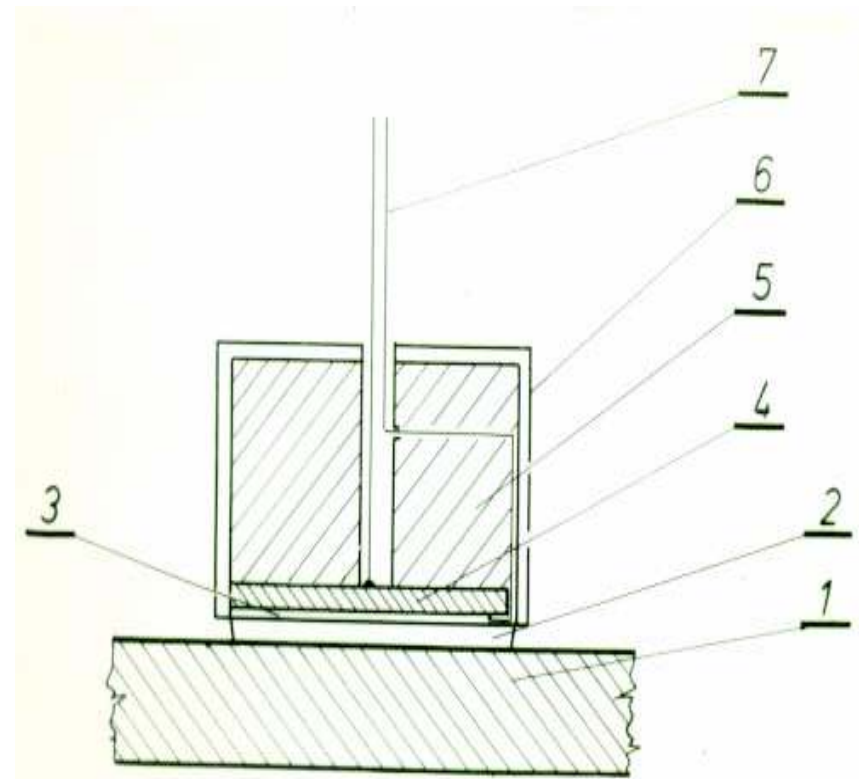
Q – oznaka za kvarc

- U ovisnosti o kutu pod kojim se šire ultrazvučni valovi, razlikuju se tri vrste ultrazvučnih glava:
 - normalna,
 - kutna i
 - površinska.

8.4.4.1. Normalna ultrazvučna glava

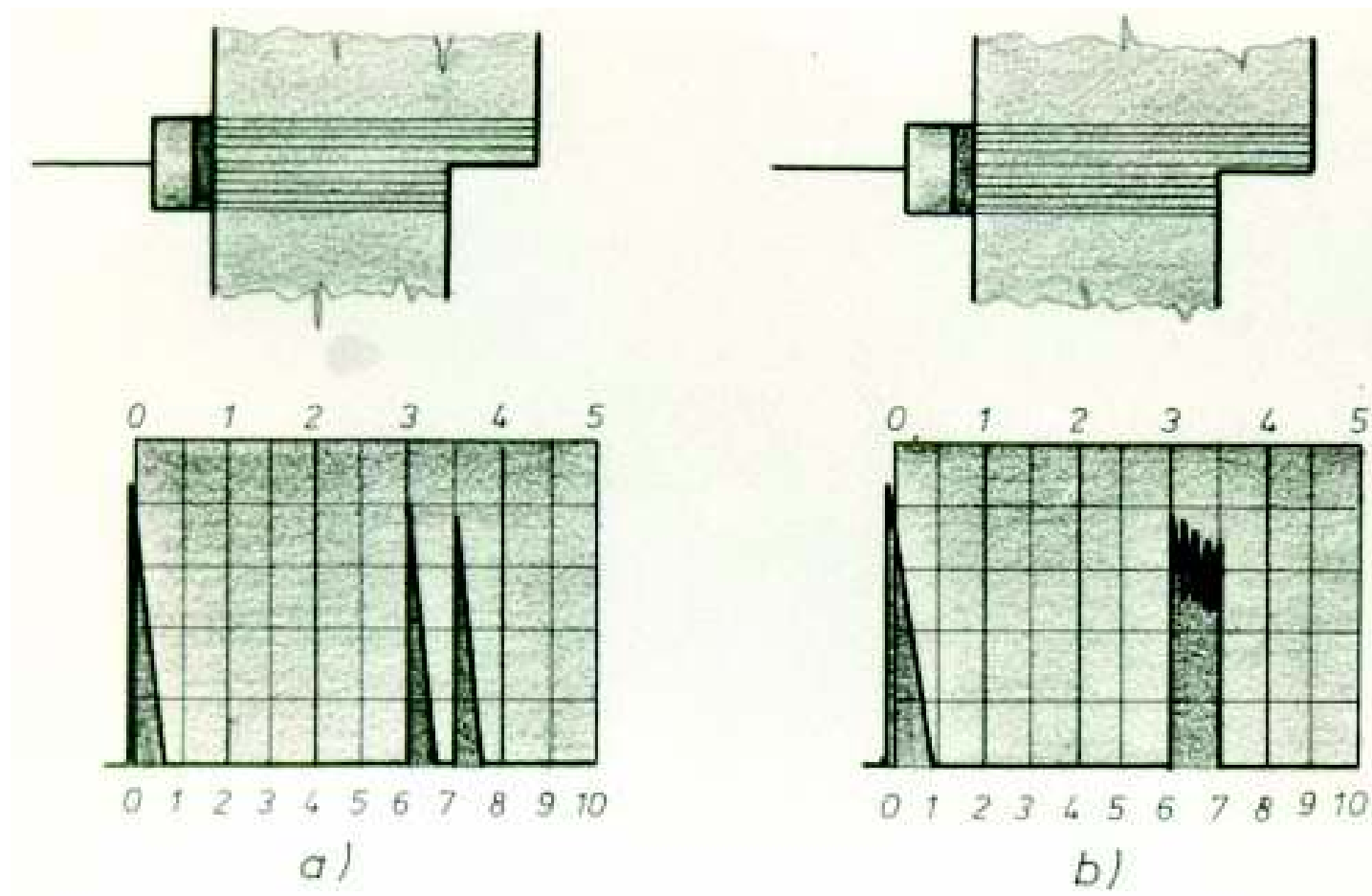
Najvažniji dijelovi normalne ultrazvučne glave su:

1. ispitivani materijal
2. zaštitni prsten
3. zaštitna folija i sredstvo za akustični sklop
4. piezoelektrični kristal
5. blok za prigušivanje
6. kućište
7. dovod napona



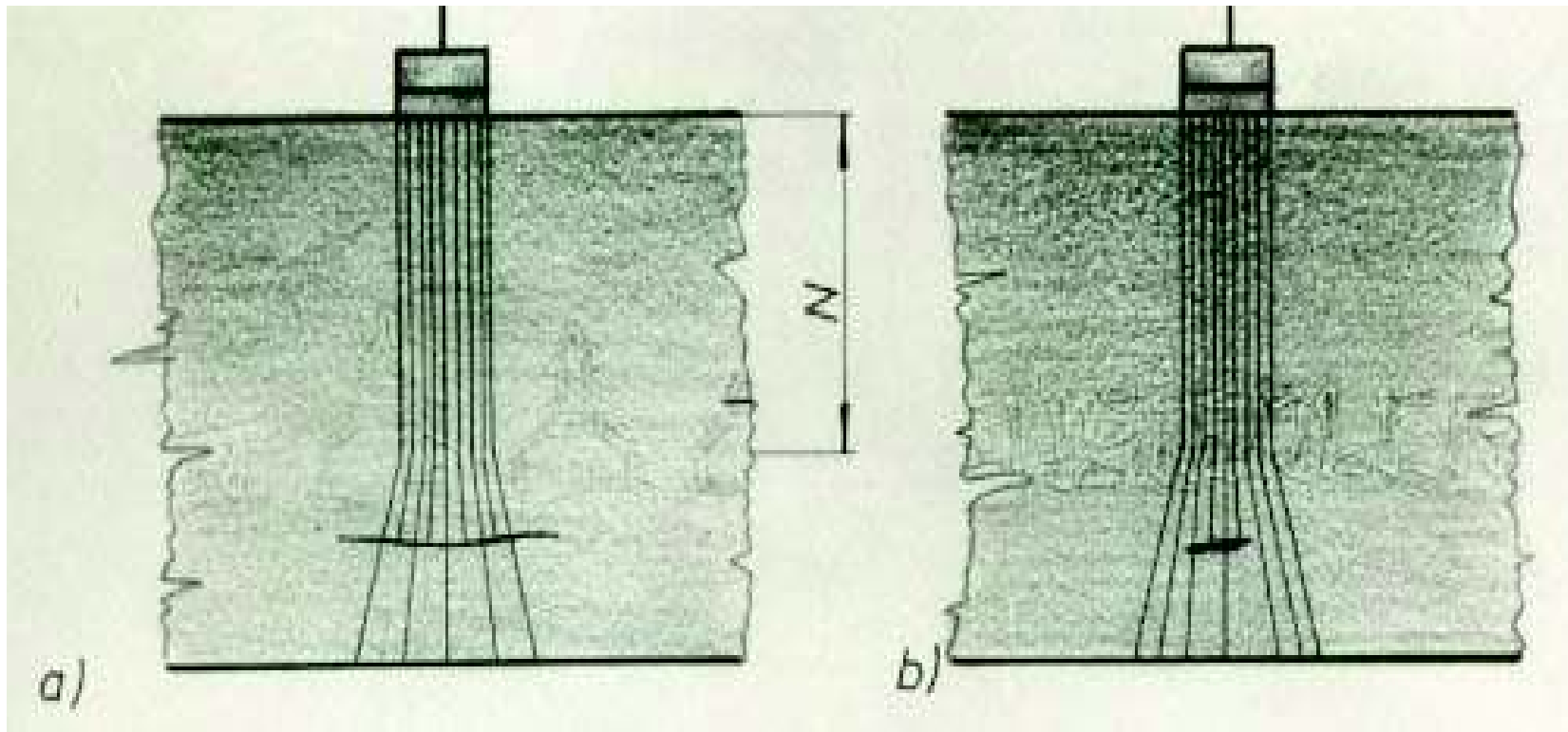
- Slika 8.35: Shema normalne ultrazvučne glave

- Osnovna joj je karakteristika **osjetljivost**.
- Osjetljivost normalne ultrazvučne glave utoliko je veća što se više električne energije pretvori u zvučnu energiju.
- Tako se osim kvarca upotrebljavaju i drugi materijali. Npr. barijev titanat pretvara mnogo više električne u zvučnu energiju nego što to čini kvarc. On s druge strane ima bitan nedostatak jer nije otporan na habanje zbog čega ga treba zaštititi, a to , pak, stvara veću mrtvu zonu.
- Drugo svojstvo ultrazvučne glave je njena **selektivnost**.
- Ocjenjuje se prema tome kolika je najmanja udaljenost između dva defekta u materijalu (reflektora), a da daju jasne uzastopne signale, npr. na stepenastim prijelazima.

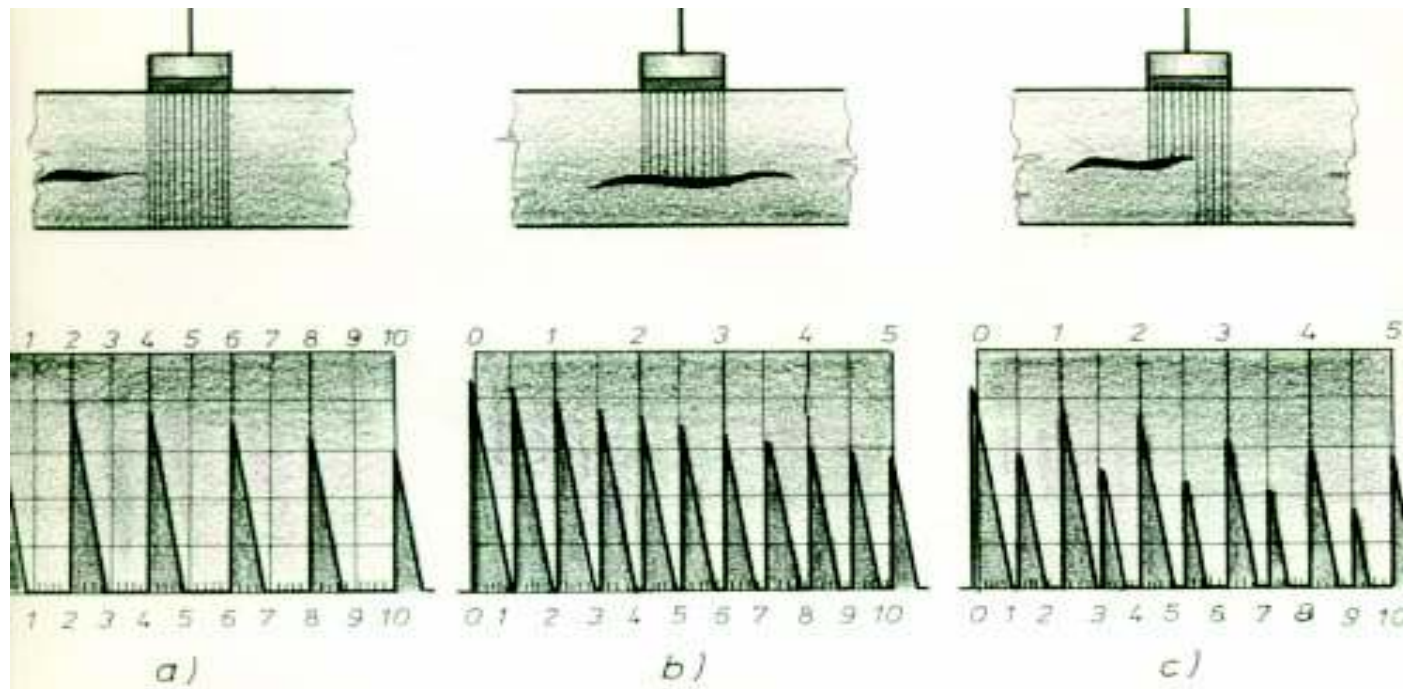


Slika 8.36: Ispitivanje s normalnom ultrazvučnom glavom

- Da bi se spriječilo slobodno vibriranje ultrazvučne glave koriste se ***prigušivači***. Oni imaju zadatak da u određenoj mjeri priguše slobodno vibriranje vibratora i potpuno priguše ultrazvučne valove koji putuju u blok, a smiju se vraćati u vibrator.
- Ispitivanje s normalnom ultrazvučnom glavom dana je na slikama 8.37 i 8.38.



- Slika 8.37: Defekti u ispitivanom materijalu
 - a) Veliki defekt- veći od širine ultrazvučnog snopa
 - b) Mali defekt- manji od širine ultrazvučnog snopa

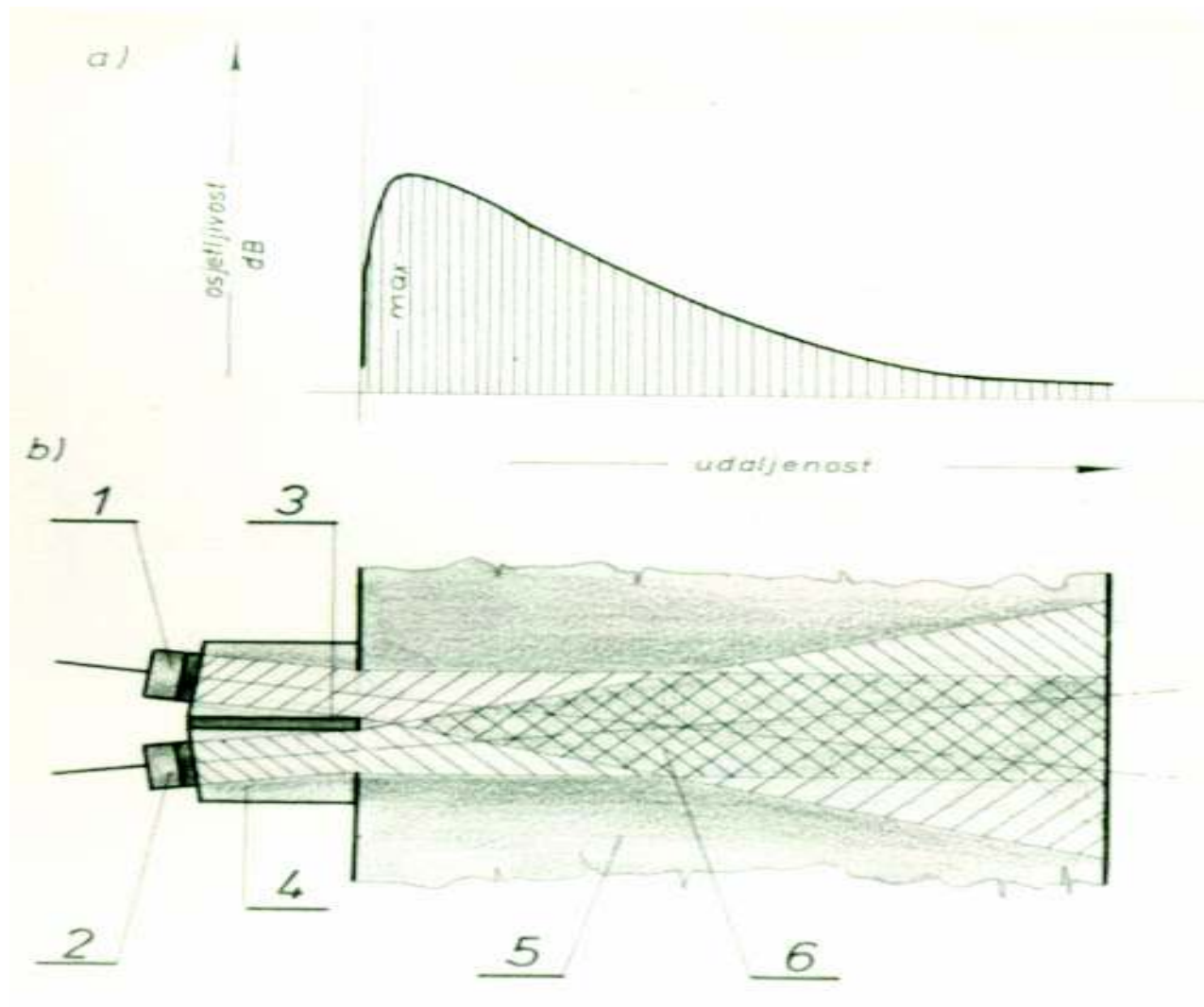


Slika 8.38: Karakteristični odjeci

- a) od zadnje stjenke
- b) od defekta
- c) djelomičan odjek od defekta i odjek od zadnje stjenke

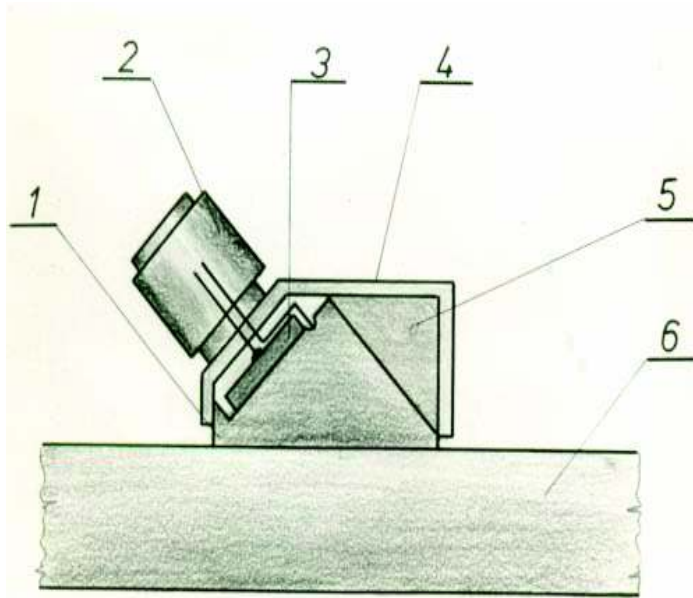
Prije ispitivanja provodi se baždarenje na karakteristične defekte, u prvom redu na zadnju stjenku. Komparacijom odjeka od defekta (reflektora) i odjeka zadnje stjenke moguće je dobiti veličinu defekta

- Za ispitivanje tankih limova i defekata blizu površine te neravnina zadnje stjenke koriste se ultrazvučne glave s dva vibratora: jedan šalje ultrazvučne valove a drugi ih istovremeno prima. To su SE vibratori.
- Za određivanje veličine defekta nisu najpogodniji, ali se koriste za identifikaciju defekta i mjerenje debljine stjenke do min 1 mm.



- Slika 8.39: SE vibrator
- a) dijagram osjetljivosti,
- b) vibrator

8.4.4.2. Transverzalne ultrazvučne glave



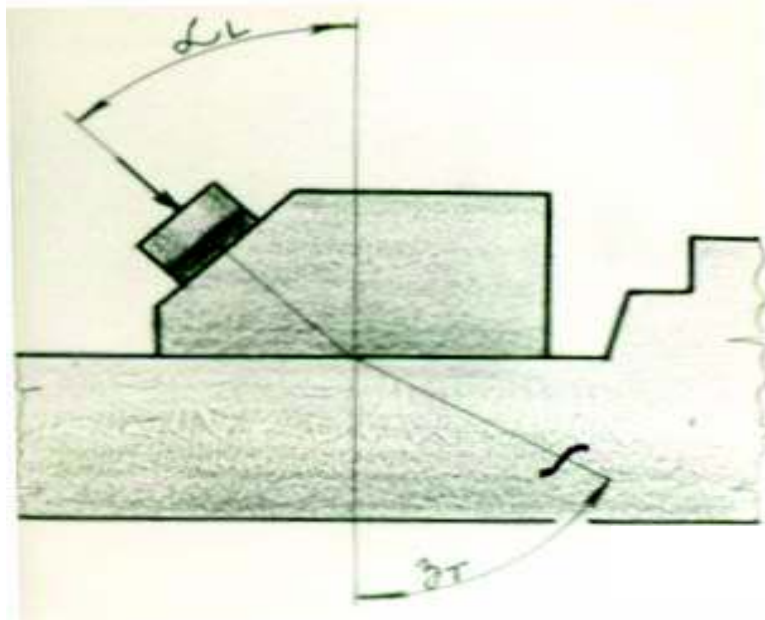
1. klin
2. držač
3. kristal kvarca
4. kućište
5. blok za prigušivanje
6. ispitivani materijal

Slika 8.40: Transverzalne ultrazvučne glave

Za razliku od normalne ultrazvučne glave, transverzalna ultrazvučna glava ima ugrađen klin iz pleksiglasa. Zbog prigušivanja u pleksiglasu upotrebljavaju se jaki vibratorji, npr barijev titanat.

Pogodna je za kontrolu defekata smještenih pod kutom, gdje je pristup normalnoj i SM ultrazvučnoj glavi nemoguć.

Određivanje veličine defekta transverzalnom ultrazvučnom glavom



Slika 8.41: Određivanje veličine defekta transverzalnom ultrazvučnom glavom

Obično se rade s kutovima $\beta_T = 35^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 70^\circ$ i 80° , dok nagib klina iznosi $\alpha = 29^\circ, \alpha = 34,6^\circ, \alpha = 47^\circ, \alpha = 55,5^\circ$ i $\alpha = 56,3^\circ$.

- Kod kuta $\beta_T < 35^\circ$ postoji mogućnost divergencije zvučnog snopa, a kod
- $\beta_T > 80^\circ$ postoji mogućnost pretvaranja transverzalnog vala u površinski..

8.4.5. Priprema i provođenje ispitivanja

- Prije ispitivanja ultrazvukom treba **pripremiti površinu** na prikladan način, osobito oko se traži ne samo greška, već i njena analiza.
- Da bi se osigurao akustični kontakt, nanosi se na površinu komada tekući premaz koji uklanja i najmanji zračni sloj.
- Ultrazvučna ispitivanja treba raditi uz prethodno dobro poznavanje ispitivanog materijala.
- **U pravilu treba znati svrhu uporabe metode i očekivane defekte u materijalu.**
- Osoba koja provodi ispitivanja mora posjedovati certifikat o izobrazbi za metodu koju koristi u ispitivanju.

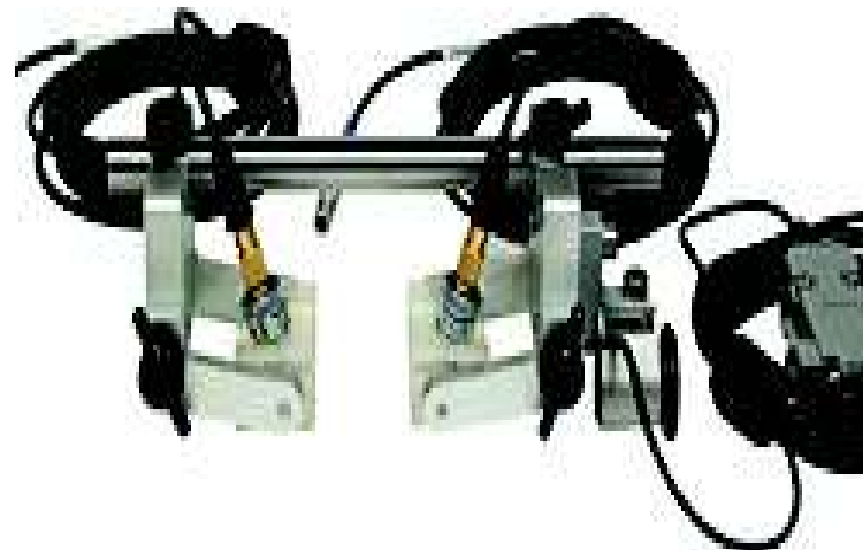


Slika 8.42: Uređaji za ultrazvučna ispitivanja

Ultrazvučni uređaj OMNISCAN MX

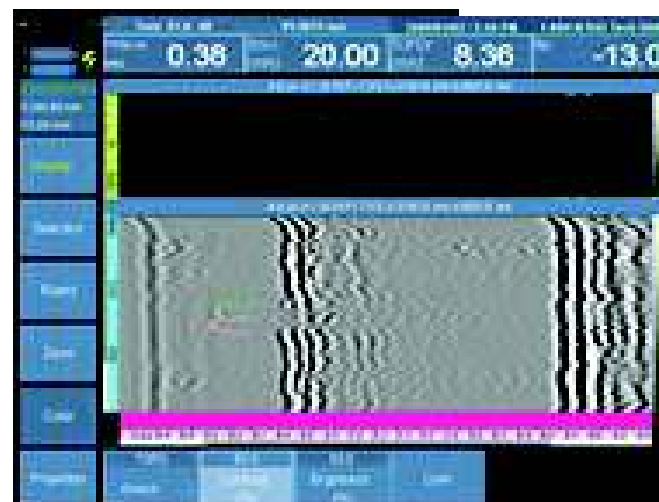


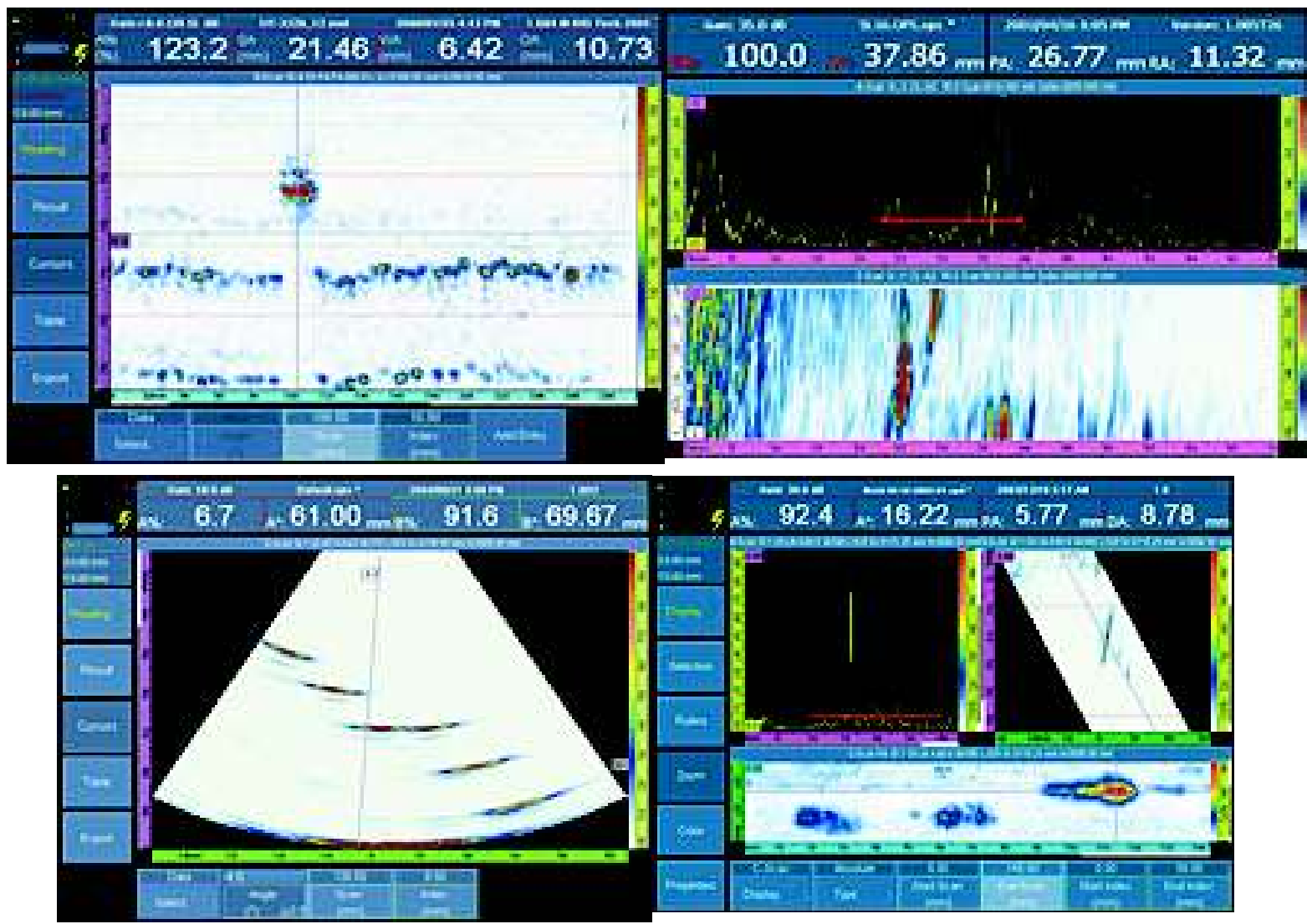
Skener hst-x04 sa sondama i enkoderom za TOFD ispitivanje



Izgled zapisa nakon ispitivanja

Slika 8.43: Uređaji za ultrazvučna
ispitivanja





Slika 8.44: Uređaji za ultrazvučna ispitivanja

U metalurškoj praksi ultrazvuk se najčešće koristi kod:

- a. ispitivanja odljevaka
- b. ispitivanja otkivaka
- c. ispitivanja trake i profila
- d. ispitivanja cijevi
- e. mjerenja debljine stjenke
- f. ispitivanja varova

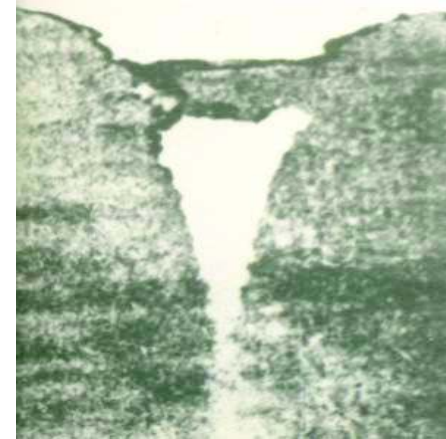
a. Ispitivanje odljevaka i otkivaka

U odljevcima su najčešće greške uključci, lunkeri, pukotine, poroznosti, plinski mjehuri, nehomogenosti, itd. .

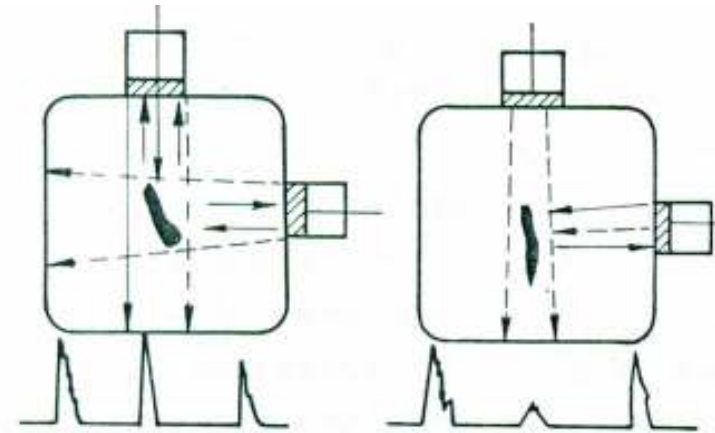
O njima je već bilo riječi. Koju metodu će se upotrijebiti, ovisi o veličini i obliku odljevka.

- Ultrazvučno se ispituju s normalnom ultrazvučnom glavom.
- Na granicama defekta potrebno je ispitivanje na dvije okomite plohe, naročito kod ispitivanja deformiranih (valjanih, kovanih ili prešanih proizvoda ili poluproizvoda), jer lunkeri mogu biti nakon deformacije neugodno orijentirani.

■ Lunker u odljevcima

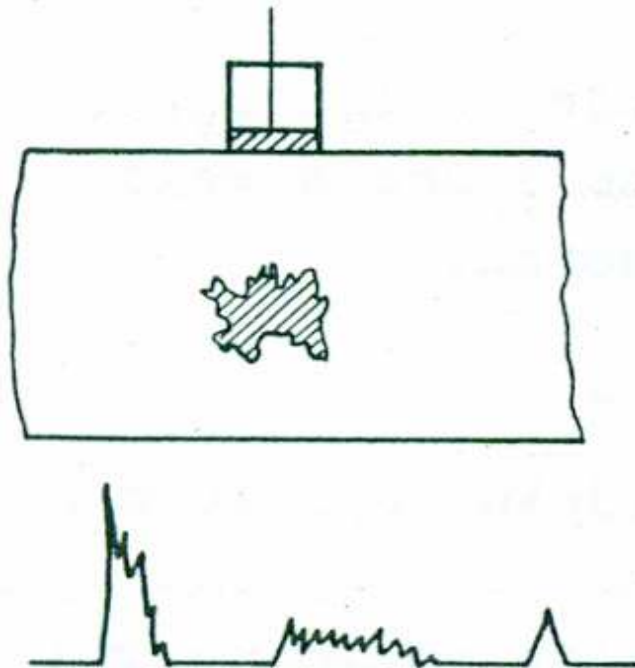


Slika 8.45: Lunker u odlevku



Slika 8.46: Lunker u otkivku⁴³⁸

Nemetalni uključci

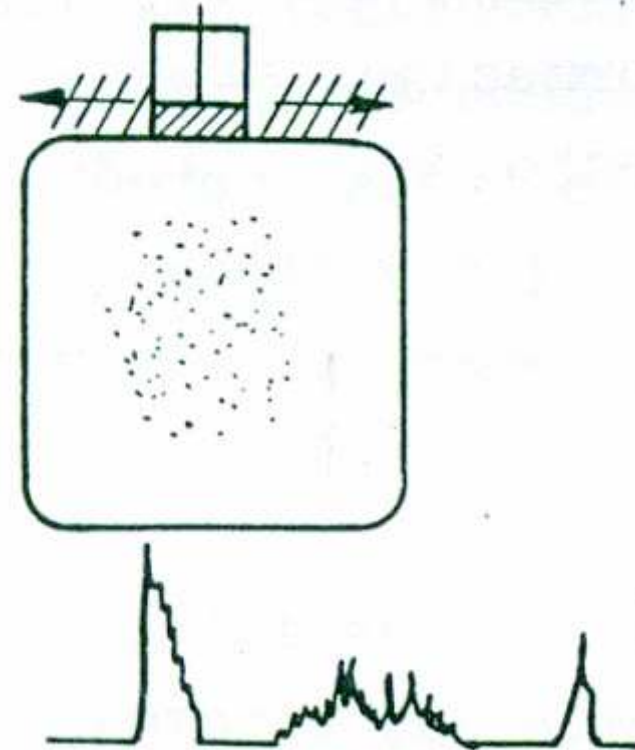


Slika 8.47: Nemetalni uključci

- Mogu se naći po čitavom presjeku. Obično su praćeni segregacijama u sredini ispitivanog proizvoda.
- Otkrivaju se normalnom ultrazvučnom glavom i daju izraziti odjek, ali su oni razvučeni i ne mijenjaju se mnogo kod promjene položaja ultrazvučne glave.
- Mogu unijeti veliko prigušivanje ultrazvučnog odjeka.

Segregacije

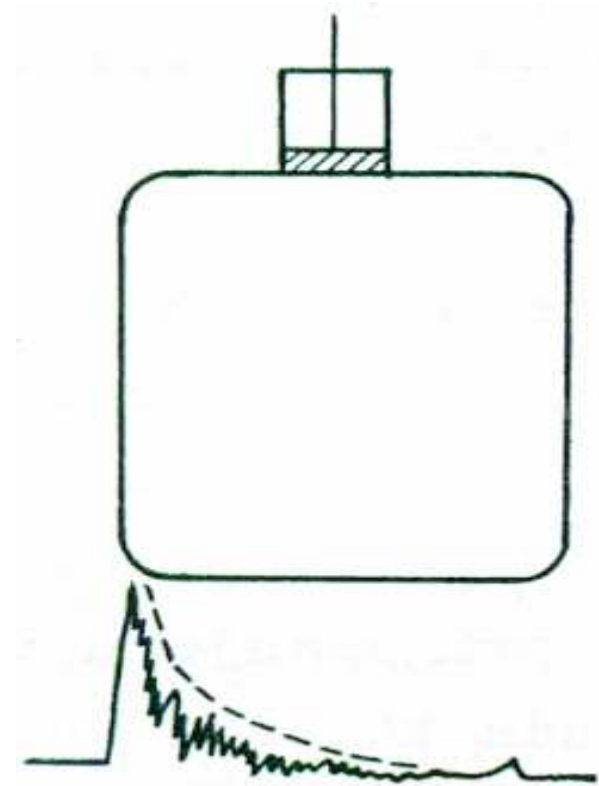
- Nastaju u centru. Obično su praćene nemetalnim uključcima, ali i ne moraju biti. Ukoliko nisu praćeni nemetalnim uključcima uopće se ne mogu otkriti. Unose veće prigušenje ultrazvučnog odjeka.



Slika 8.48: Segregacije

Grubo zrno

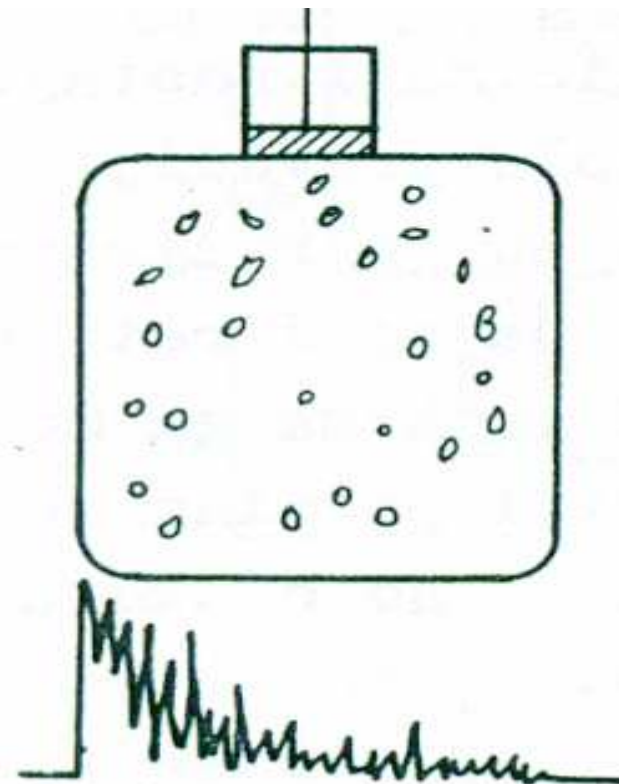
- Može se pojaviti u odljevcima i u otkivcima, naročito ako nisu žareni. Jako prigušuje odjek i jako je teško otkriti točan položaj i veličinu defekta. Od lunkera ga se može razlikovati po eksponencijalnom opadanju odjeka, a zadnji odjek obično nestaje.



Slika 8.49: Grubo zrno

Poroznost

- Javlja se u odljevcima kod neadekvatnog lijevanja. Krajnji odjek nestaje ali su vidljivi pojedini jaki odjeci koji počinju odmah u početku skale i mijenjaju se sukladno prisutnoj poroznosti u materijalu.



Slika 8.50: Jaka poroznost

b. Defekti u varovima

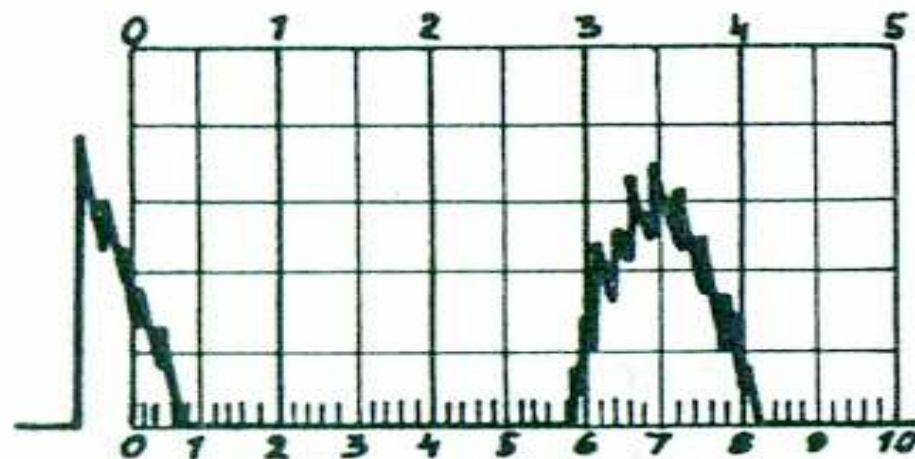
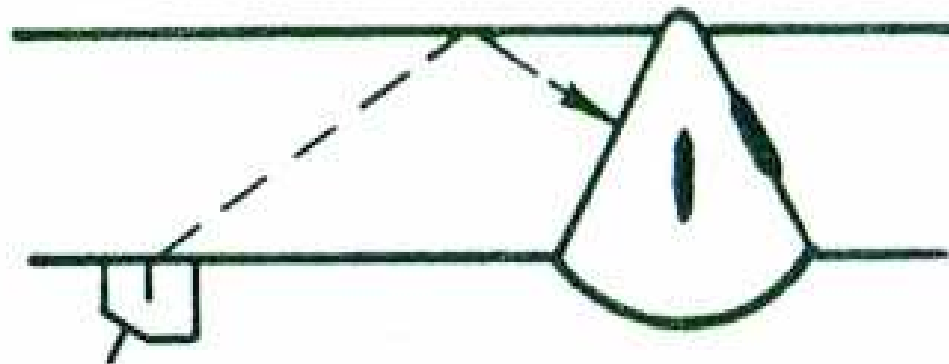
- U varovima nastaju četiri vrste defekata: uključci, neprovarenost, risevi i poroznost. Oblik ,veličina i mjesto defekta su bitni faktori za izbor ultrazvučne glave.
- **Uključci** – mogu nastati po čitavom presjeku vara, različite veličine i oblika. Odjek ima veliku širinu, razgranat je i gotopvo se ne mijenja kod promjene pravca kretanja sonde.
- **Neprovarenost** – može biti u korijenu vara, na zavarivanim stranicama ili između pojedinih slojeva (ako se zavarivanje provodi u slojevima).

- **Risevi** - Mogu se javiti po čitavom varu, ali su najčešće uzdužni. Poprečni risevi nastaju rijetko.

Općenito, plosnati defekti u varu , kao što su risevi, neprovarenosti itd, daju oštre odjeke ako se nalaze okomito na smjer zvučnog snopa.

- **Poroznosti**- mogu nastati po čitavom varu. Opasnost predstavlja kad se javljaju u gnijezdima.

Ako nastaje pojedinačno, daje nizak i oštar odjek, a ako je poroznost u gnijezdima dobije se nizak, širok i jako razgranat odjek.



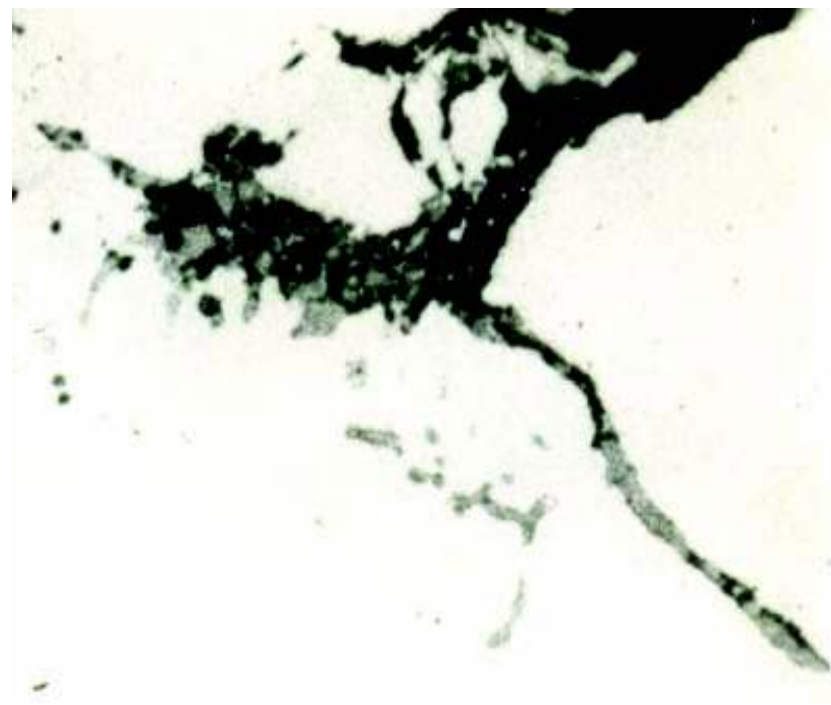
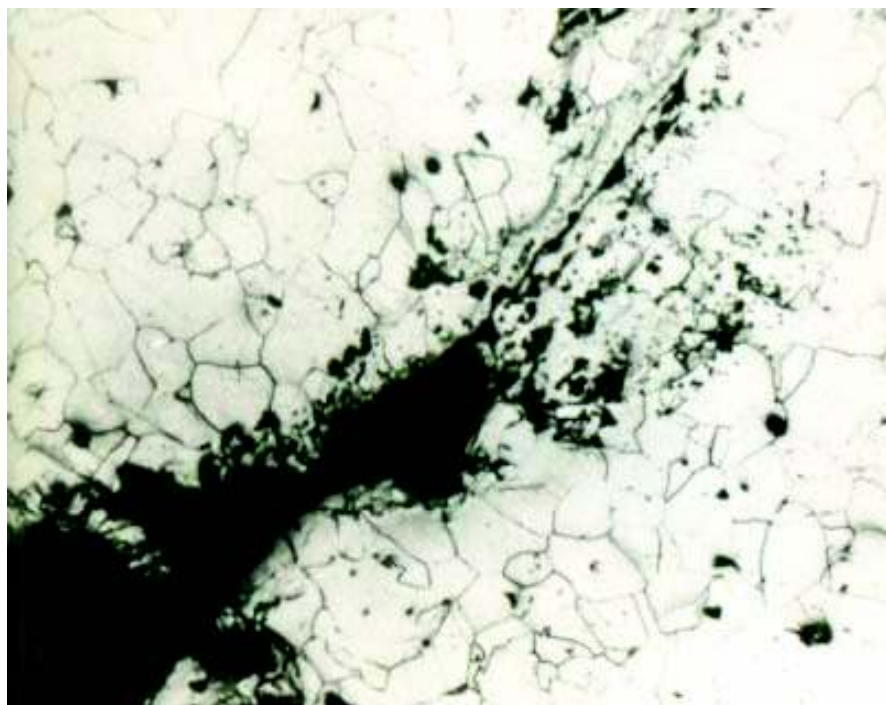
- Slika 8.51: Ispitivanje vara

c. Ispitivanje trake

Limovi i trake se mogu ultrazvučno kontrolirati sljedećim metodama:

- metoda prozvučavanja (Lambova metoda)
- metoda rezonancije
- metoda odjeka (kontaktna i u imerznoj tehnici).

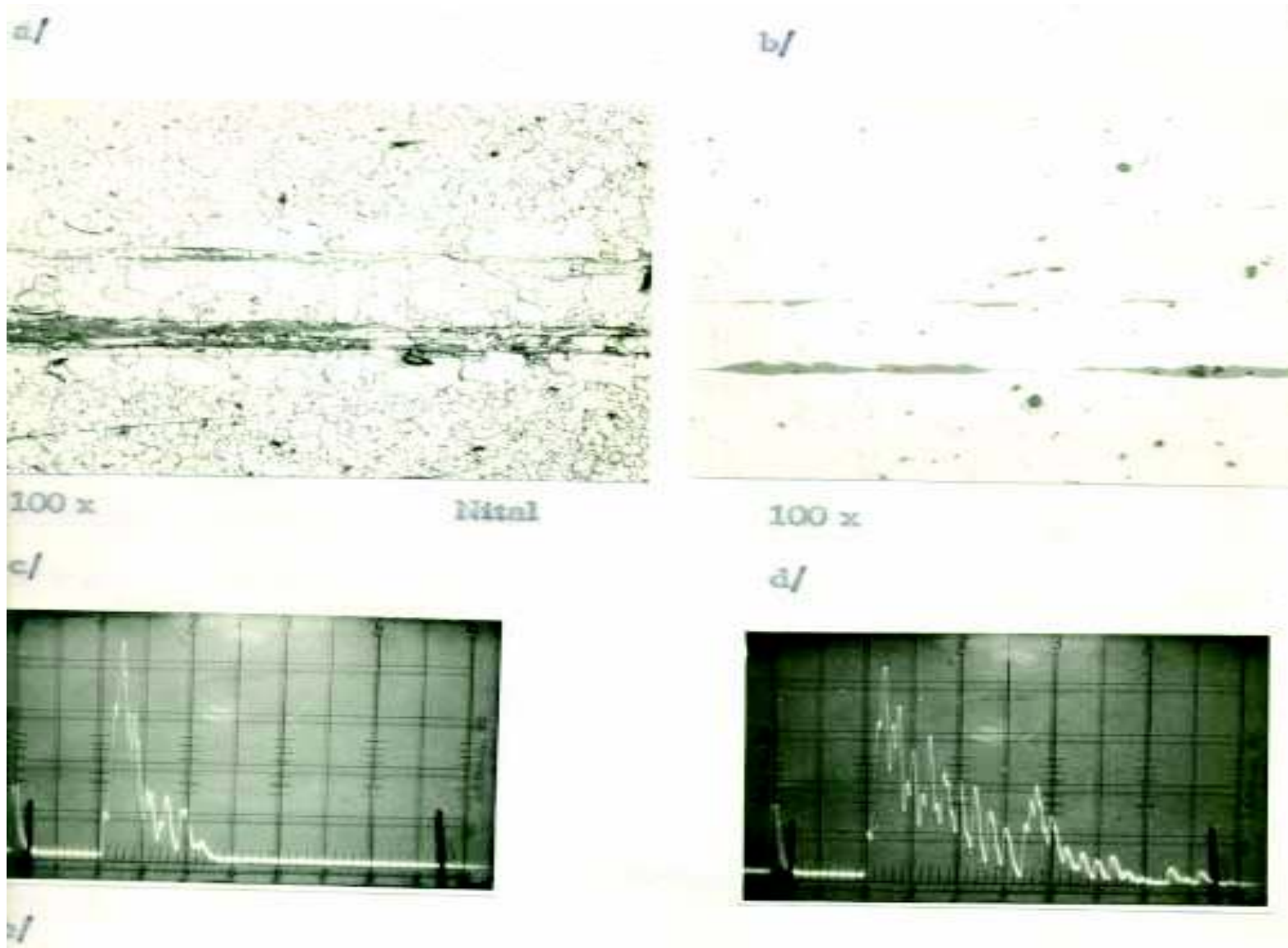
- Limovi i trake ispituju se pojedinačno ili u kontinuiranom procesu nakon proizvodnje ili prije početka daljnje preradbe. Za kontinuirane procese koriste se stacionarni uređaji i kontroliraju traku ili lim po cijelom presjeku ili dužini. Obično se otkriveni defekti označavaju bojom i odvajaju od proizvoda bez defekata, ali vrsta greške nije očita.
- O kojoj vrsti greške se radi može prepoznati iskusan kontrolor po obliku odjeka na ekranu ili se u svrhu istraživanja naknadno primjenom drugih metoda otkriva o kojoj grešci se radi.
- Na sljedećim slikama dani su primjeri najčešćih grešaka na trakama i uz neke greške karakteristični odjeci na ekranu.



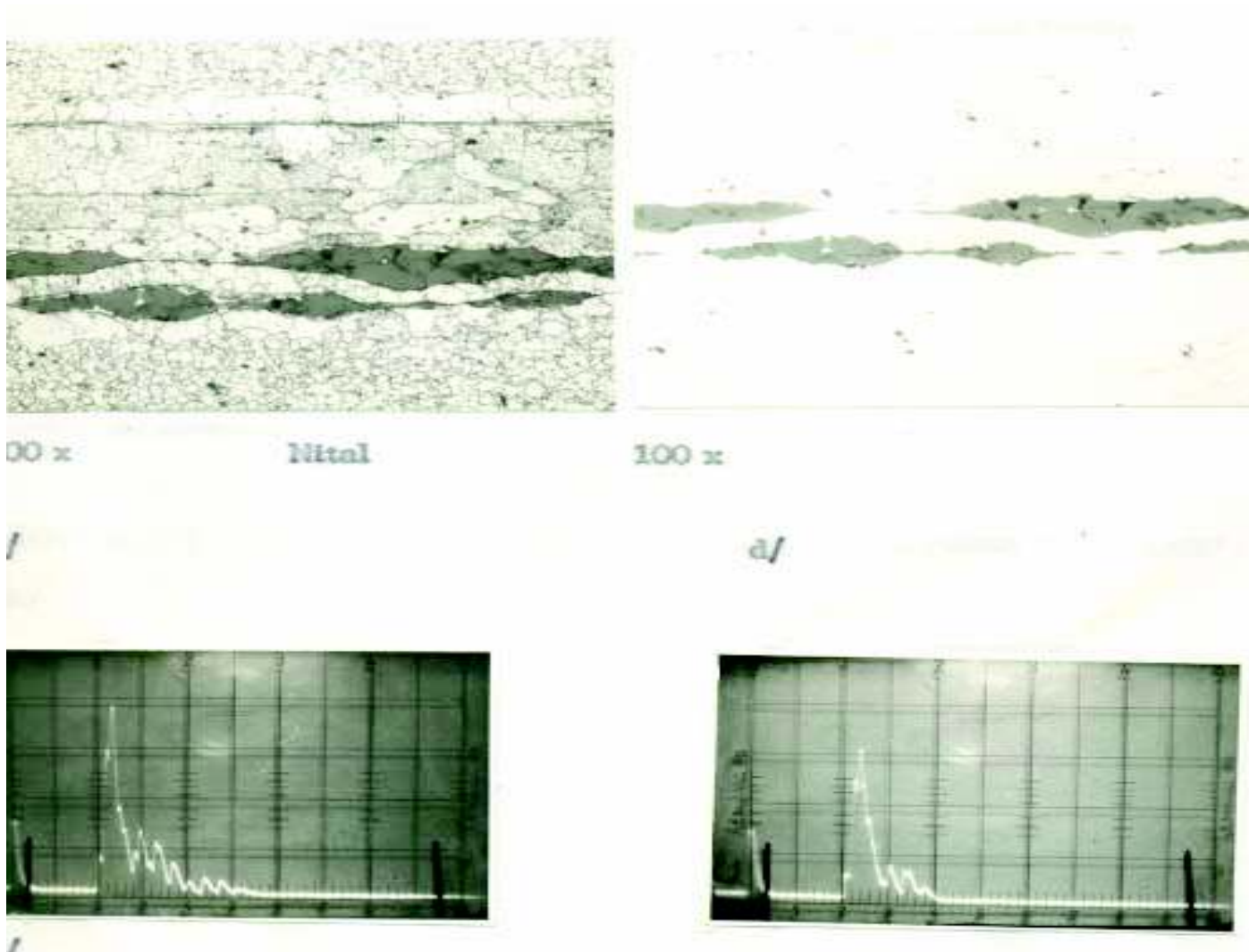
a – pukotina i oksidni ukljucci
ukljucci

b - pukotina i sulfidni

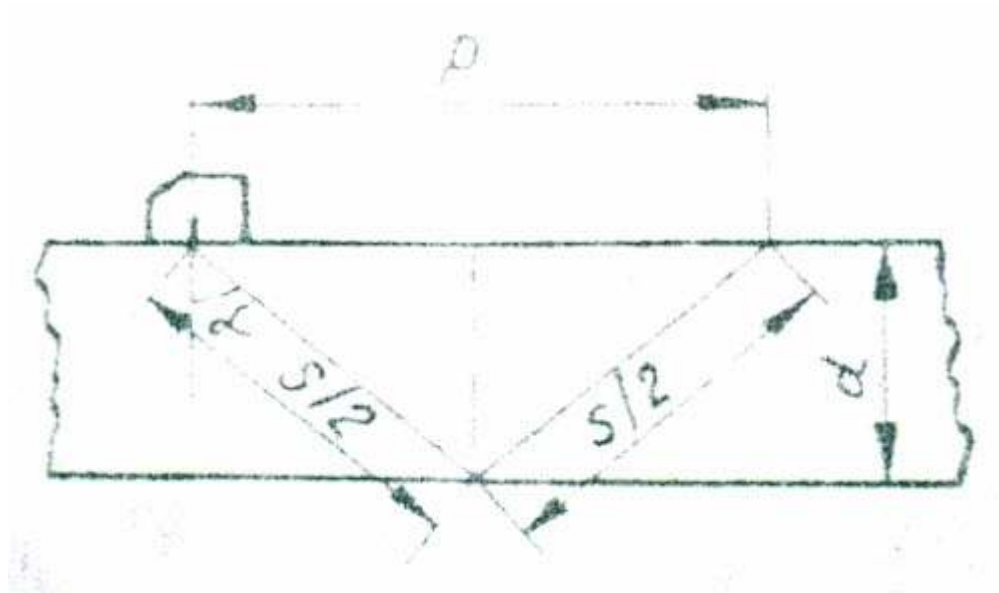
Slika 8.52 : Greške u traci



- Slika 8.53: Dvoplatna traka i sulfidni uključak



- Slika 8.54: Dvoplatna traka s teksturom valjanja i uključcima

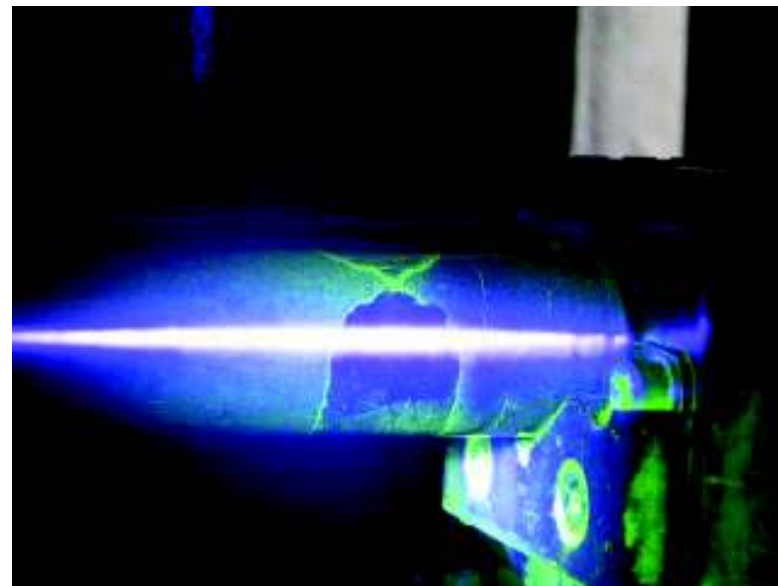
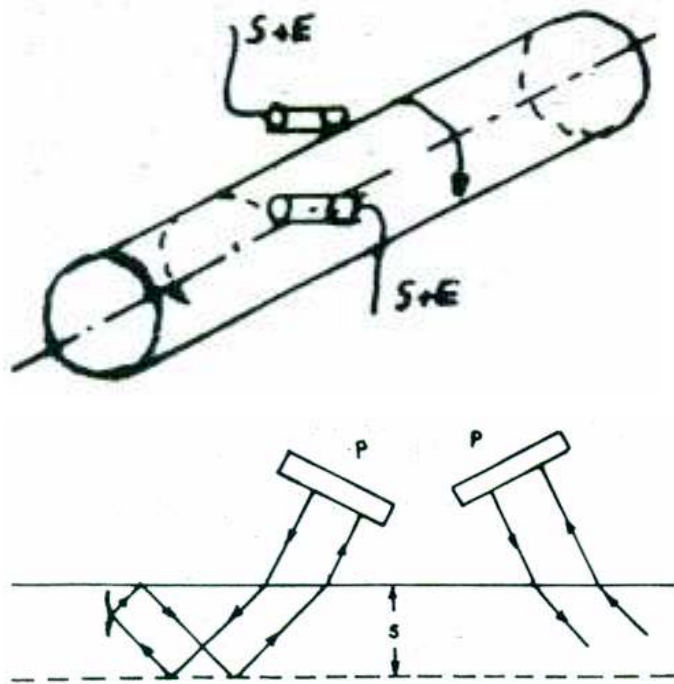


Slika 8.55: Mjerenje debljine lima

d. Ispitivanje cijevi

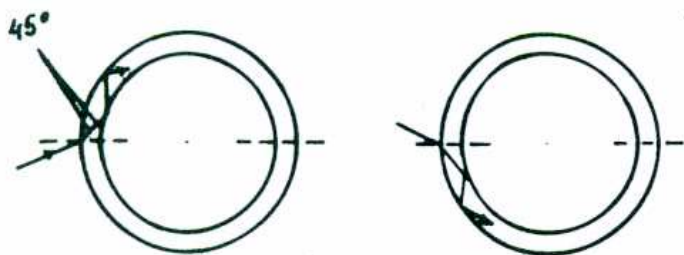
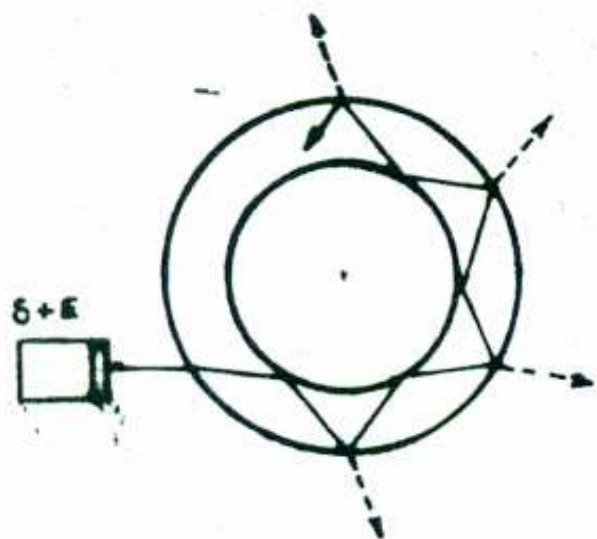
- Ispitivanje cijevi ultrazvukom moguće je sa sve tri metode:
 - metodom prozvučivanja
 - metodom odjeka
 - metodom rezonancije
- Najširu primjenu je našla metoda odjeka.
- Dimenzionalno područje, promjer cijevi:
 - > ϕ 400 mm
 - < ϕ 600mm
- Kod ispitivanja cijevi ultrazvukom razlikuju se:
 - ispitivanje defekata u materijalu i
 - ispitivanje odstupanja dimenzija.

- Ispitivanje se provodi s dvije glave koje su paralelno uključene.
- Dubina pronađene greške određuje se na temelju visine odjeka, a dužina se mjeri pomicanjem ultrazvučne glave uzduž cijevi.



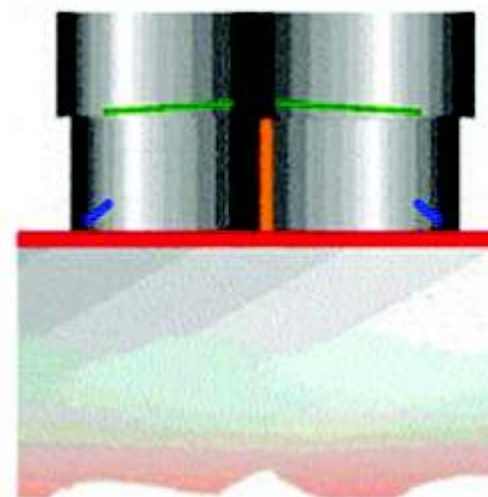
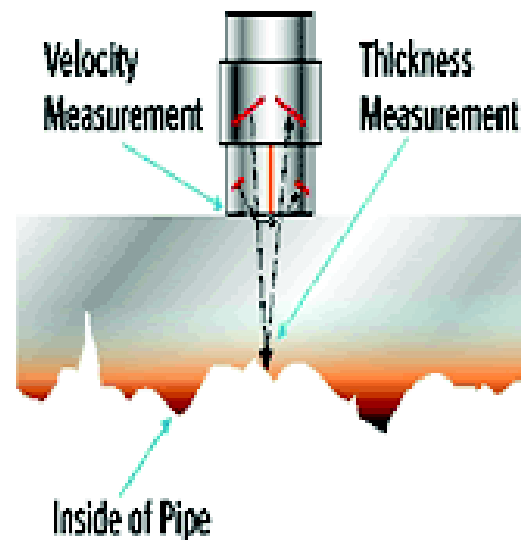
Slika 8.56: Ispitivanje cijevi

e. Mjerenje debljine stjenke



Slika 8.57: Mjerenje debljine stjenke

- Za stjenke iznad 8mm koristi se metoda odjeka
- Točnost mjerenja ovom metodom je manja u odnosu na kontaktnu metodu rezonancije koja ima visoku točnost, ali ima sporo mjerenje.
- ***Najveću primjenu ima metoda rezonancije u imerznoj tehnici.***
- Osim velike brzine mjerenja i lake automatizacije metode, moguća je kontrola cijevi promjera od 3mm i debljine stjenke 0,2mm.
- Moguća je kontrola cijevi različitog profila.
- Točnost metode je 0,1 do 0,2 % od debljine mjerene stjenke.



Slika 8.58: Ultrazvučni mjerač debljine stijenke (demetri) DM 4

- Kod debelostjenih cijevi moguće je stjenku mjeriti metodom odjeka uz grešku $\pm 1\%$.
- Za mjerenje debljine stjenke limova koristi se metoda rezonancije. Koriste se kutne glave.

- Debljina lima:
 - do 15mm - 80°
 - do 30 mm - 70°
 - 30 – 60 mm - 60°
 - iznad 50 mm - 45° .

8.5. PENETRACIJSKE METODE

Metode ispitivanja:

- penetracijske tekućine
- luminiscentna

8.5.1. Penetracijske tekućine

- Ovom metodom otkrivaju se površinski defekti.
- Penetracijska tekućina nanosi se na površinu i ispunjava defekte na površini. Nanošenjem praha on upija tekućinu i promijeni boju.
- Ovom metodom ispituju se razni odljevci, itd.

Moguće je otkriti površinske defekte:

pukotine

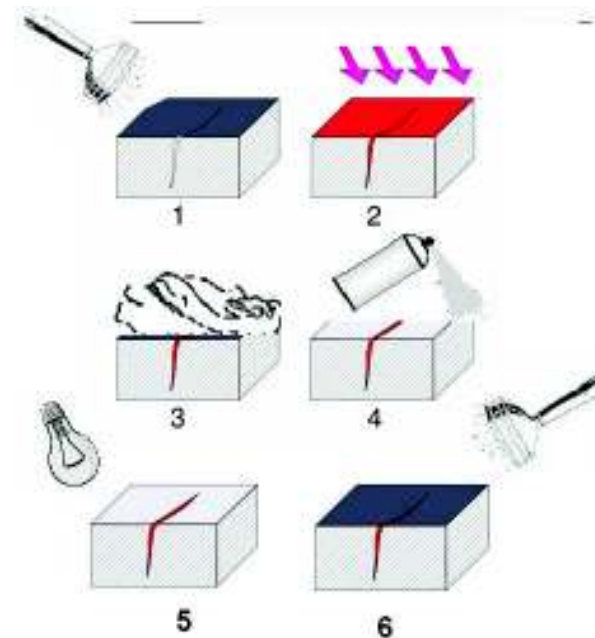
lunkere

zone interkristalne korozije.

Veličina pukotina koje se mogu otkriti ovom metodom su:

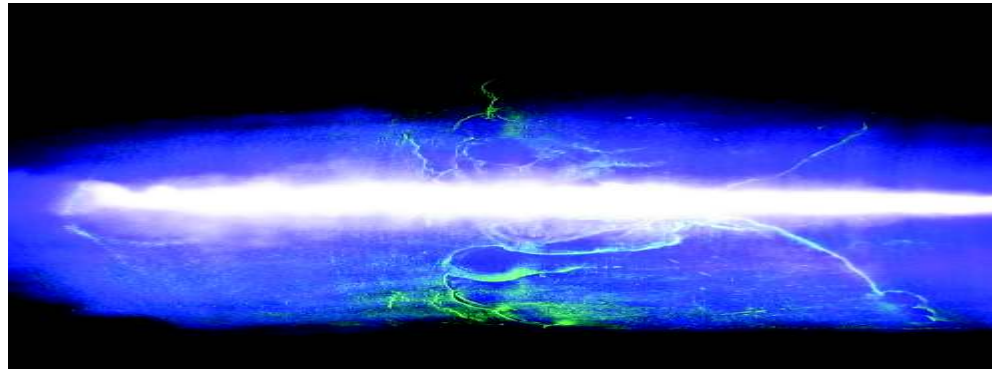
- dužina od 0,1 mm
- širina 0,03 do 0,05 mm.

Dužina širenja greške određuje se neposrednim mjerenjem, a širina greške jako je uvećana



8.5.2. Luminiscentna metoda

- Za razliku od prethodne metode, površinski defekti ispunjavaju se penetracijskom tekućinom koja svijetli pri osvjetljenju ultravioletnim svjetlom.
- Preciznost mjerenja je kao i kod prethodne metode.
- Kod ispitivanja penetracijskom tekućinama mora se voditi računa o izboru tekućine i posebice rukovanju istom jer su neke od njih otrovne.



NORME

- HRN CR 13935:2001, Nerazorno ispitivanje – Temeljni obrazac
- HRN EN 12668-1:2001- 1. dio, Karakterizacija i provjera opreme za ispitivanje ultrazvukom
- HRN EN 583-2:2001, Nerazorno ispitivanje- Ispitivanje ultrazvukom.
- HRN EN 473-2:2001, Kvalifikacija i potvrđivanje osoblja

9. PREPORUČENA LITERATURA

1. Mamuzić, Ultrazvuk i njegova primjena u kontroli, Željezara Sisak 1969. (Interna skripta)
2. M. Franc, Mehanička svojstva materijala, FSB, Zagreb, 1998.
3. I. Vitez, Ispitivanje mehaničkih svojstava metalnih materijala, Strojarski fakultet, Slavonski Brod, 2006.
4. V. Krstelj, Ultrazvučna kontrola, FSB, Zagreb, 2003.
5. Citirane norme: EN, HRN EN, DIN, ISO
6. Različiti časopisi - članci s ovog područja

- Fakultetsko vijeće Metalurškog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu na 8. redovitoj sjednici od 20.srpnja 2009. prihvatilo je pozitivno mišljenje Povjerenstva za recenziju nastavnog teksta predavanja iz kolegija ISPITIVANJE MATERIJALA, dr.sc. Stojke Rešković, docentice i odobrilo da se postavi na Internetsku stranicu Metalurškog fakulteta. Povjerenstva za recenziju:
 - 1. prof.dr.sc. I. Mamuzić, Metalurški fakultet Sisak
 - 2. prof.dr.sc. I. Vitez, Strojarski fakultet Slavonski Brod
 - 3. prof.dr.sc. L. Lazić, Metalurški fakultet Sisak