

MERENJE NAPONA I DEFORMACIJA

Radni naponi mašinskih delova i konstrukcija se ne mogu meriti (registrovati) direktno već indirektno na osnovu izmerenih elastičnih deformacija. Na osnovu izmerenih deformacija i poznate zavisnosti između napona i deformacija u oblasti elastičnih deformacija može se doći do naponskog stanja mašinskih delova i konstrukcija:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon,$$

$$\tau = G \cdot \gamma,$$

gde su:

ε – izmerena jedinična deformacija,

γ – ugao klizanja ($\gamma = 2\varepsilon$)

E – modul elastičnosti materijala mašinskog dela,

G – modul klizanja materijala mašinskog dela.

Veza između modula elastičnosti i modula klizanja data je sledećim izrazom:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)},$$

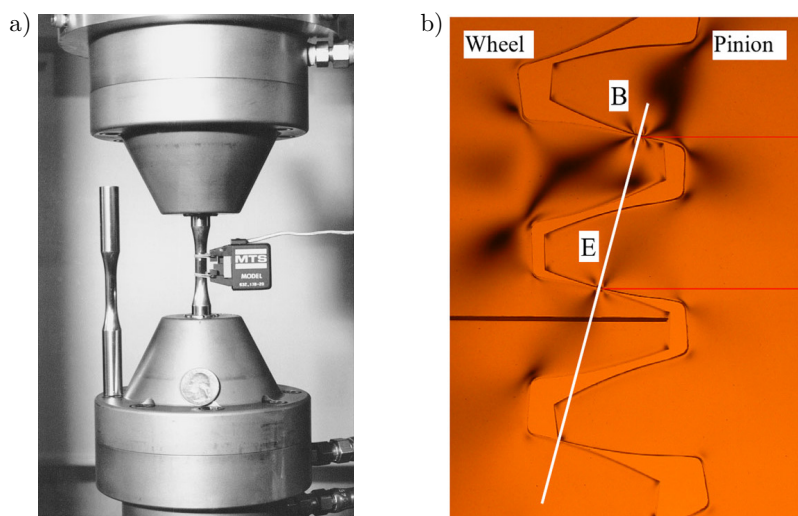
gde je ν Poasonov koeficijent. To je bezdimenziona karakteristika čija veličina zavisi od vrste materijala, koja govori o vezi između podužne (ε) i poprečne deformacije (ε_p) mašinskog dela:

$$\varepsilon_p = -\nu \cdot \varepsilon.$$

Vrednosti Poasonovog koeficijenta kod metala kreću se u granicama $0,25 < \nu < 0,35$.

Sa sve većim zahtevima i potrebama za ispitivanjem mašinskih konstrukcija razvijale su se različite metode za merenje napona i deformacija. Ove metode merenja mogu se svrstati u više grupa, i to:

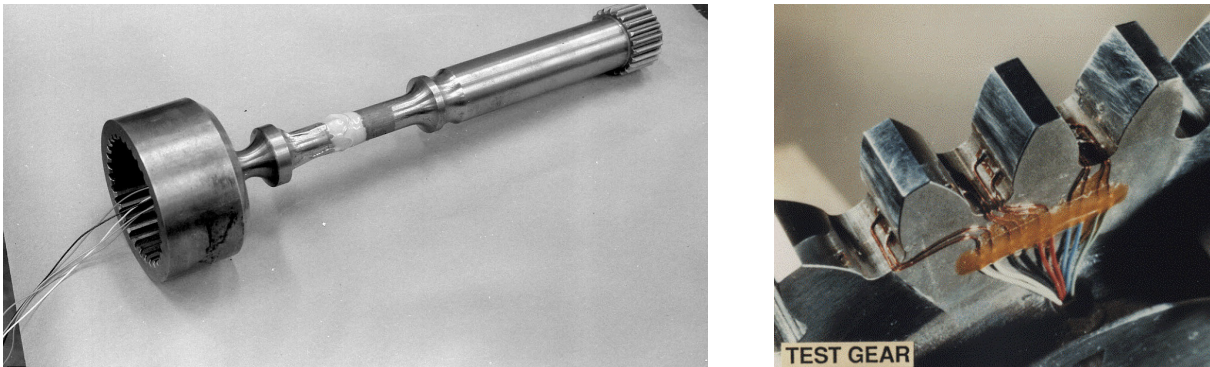
- ekstenzometrijske metode (Slika 1a),
- metoda fotoelastičnosti (Slika 1b),
- metoda krtog laka,
- Moare metoda,
- ultrazvučna metoda i dr.



Slika 1 a) ekstenziometrijska metoda, b) metoda fotoelastičnosti

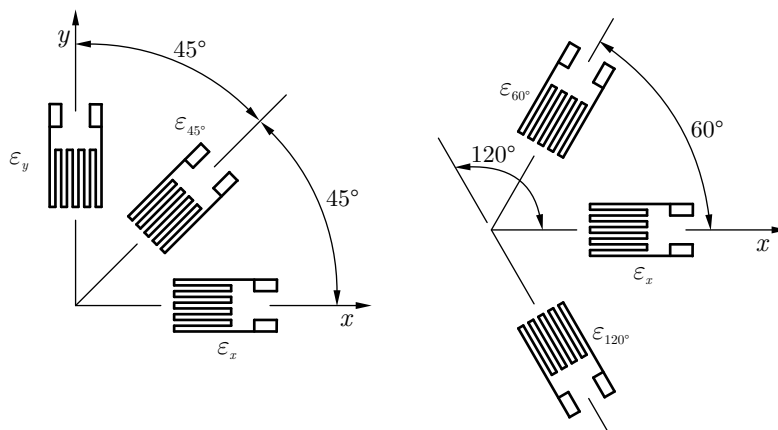
Ekstenziometri su naprave ili instrumenti pomoću kojih se meri lokalna deformacija na konstrukciji usled opterećenja. Veličina ovih promena (lokalnih deformacija) može se meriti mehaničkim putem (Slika 1a), pomoću tzv. mehaničkih ekstenzometara, optičkih ekstenziometara ili pomoću elektro-otpornih mernih traka.

Merne trake, Slika 2, su merni elementi koji se lepe na određenu površinu ispitivane konstrukcije i one se deformišu zajedno sa lokalnom deformacijom konstrukcije. Merne trake se razlikuju prema obliku i prema tehnologiji izrade. Prema tehnologiji izrade merne trake mogu biti napravljene od žice, folije ili poluprovodnika. Po svom obliku, merne trake mogu biti: linijske ili u obliku rozeta.



Slika 2 Merne trake zalepljene na različitim mašinskim delovima

Linijske merne trake su jednostruki elementi i primenjuju se kada je poznat glavni pravac napona ili deformacije. Ako nam nije poznat glavni pravac napona ili deformacije, primenjuju se tzv. rozete sastavljene od dve, tri, pa i četiri merne trake koje su postavljene na istu podlogu, pod različitim uglovima. Na Slici 3 date su dve česte konfiguracije za postavljanje mernih traka u vidu rozeta, kada nisu poznati pravci glavnih deformacija tj. napona.

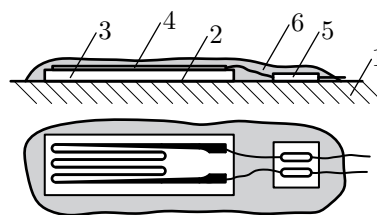


Slika 3 Dve konfiguracije rozeta, za merenje deformacija u tri pravca

Merne trake sa žicom napravljene su od tanke žice prečnika $\varnothing 20 \dots 30 \mu\text{m}$, koja je savijena nekoliko puta, a zatim zalepljena posebnim lepkom za njen noseći element, koji može biti od hartije, sintetičke mase, metalne folije i dr. Savijena žica se preko nosećeg elementa lepi neposredno na deo konstrukcije na kojoj se meri deformacija.

Na Slici 4 prikazan je izgled mernog mesta, gde su:

- 1 – konstrukcija koja se ispituje,
- 2 – lepak,
- 3 – nosač trake,
- 4 – merna traka,
- 5 – priključak,
- 6 – zaštita od vlage.



Slika 4 Izgled mernog mesta

Merne trake se najčešće koriste za merenje napona i deformacija na već izvedenim konstrukcijama, kao što su rezervoari pod pritiskom, mašine alatke, turbine, mostovi, transportna sredstva i dr. Ispitivanje konstrukcija mernim trakama zasnovano je na činjenici da se pri opterećenju konstrukcije deformiše njena površina, a ova deformacija se prenosi na mernu traku, odnosno žicu zalepljenu na mesto merenja. Deformacija merne trake, odnosno žice izaziva promenu električnog otpora u njoj, što se može registrovati mernim instrumentom.

Na osnovu Omovog zakona, jednačina za električni otpor glasi:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A},$$

gde su:

- ρ – specifični otpor materijala žice,
- l – dužina žice,
- A – površina poprečnog preseka žice.

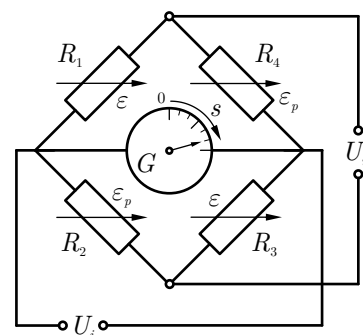
Relativna promena električnog otpora srazmerna je veličini jedinične deformacije:

$$\frac{\Delta R}{R} = B \cdot \varepsilon,$$

gde je B faktor pojačanja mernog mosta.

Zbog malih deformacija i promena električnog otpora je mala. Iz tih razloga merni instrument mora da bude veoma osetljiv. U praksi se najčešće koristi Vitstonov most za merenje deformacija pomoću mernih traka, Slika 5.

Most se sastoji od četiri grane koje čine otpori od R_1 , R_2 , R_3 i R_4 , napona napajanja U_n i izlaznog napona U_i koji se registruje na galvanometru G (osetljivom mernom instrumentu). Vitstonov most napaja se strujom preko dva čvora, a električna ravnoteža se meri galvanometrom na druga dva. Ako se pre uvođenja sile, promenom veličine otpornika, na galvanometru uspostavi ravnoteža (nulto stanje), pri dejstvu sile, usled promene otpora merne trake, dolazi do skretanja kazaljke galvanometra. Na ovaj način uspostavlja se veza između deformacije ε i električnog napona.



Slika 5 Vitstonov most

Merne trake koje se nalaze u suprotnim granama Vitstonovog mosta mere deformaciju istog znaka, a merne trake u susednim granama mere deformacije različitog znaka. Skretanje kazaljke na mernom instrumentu odgovara relativnoj promeni otpora i srazmerno je jediničnoj deformaciji mašinskog dela:

$$s = \frac{\Delta R}{R} = B \cdot \varepsilon.$$

Tačnost merenja zavisi od mnogobrojnih uticajnih faktora, kao npr.: izbora merne trake, lepka, postupka lepljenja, izbora kablova, zatim povezivanja sa mernim instrumentom, priključenja i izbora pojačala, kao i pripreme mernog mesta za lepljenje mernih traka. Tačnost merenja zavisi i od radnih uslova, kao, npr.: temperature, vlage, raspona opterećenja, vrste opterećenja (statičko, dinamičko), hemijskih uticaja itd. Da bi se dobio kvalitetan spoj merne trake i ispitivane konstrukcije, mora se merno mesto pažljivo pripremiti. Merno mesto na koje se postavlja merna traka treba da bude očišćeno od korozije, boje i drugih nečistoća brusnim papirom, a zatim se površina brusi. Posle toga se odmašćuju površine. Na očišćenu površinu konstrukcije i naličje merne trake nanosi se tanak sloj lepka (oko 10-15 μm) i traka se zalepi na mernu površinu. Vreme sušenja merne trake zavisi od primenjenog lepka. Zalepljene i osušene merne trake povezuju se preko izvoda i priključaka lemljenjem za mernu instalaciju. Zatim se merna mesta na koja su trake zalepljene, zalivaju voskom, silikonskom gumom ili drugim pogodnim materijalom radi izolacije od vlage.

Praktična realizacija je znatno složenija. Napajanje i uravnotežavanje Vitstonovog mosta ostvaruje se korišćenjem složenih elektronskih sistema. Merenje deformacije pomoću galvanometra moguće je samo ako je promene ove veličine spora. Brze promene se registruju korišćenjem pisača (mehaničkih, svetlosnih ili magnetnih). Najnovija rešenja podrazumevaju analogno-digitalnu konverziju izmerene veličine i unošenje u digitalne sisteme tj. računare.

Vek trajanja ispravno postavljene merne trake iznosi od nekoliko dana do nekoliko godina.

Dobre karakteristike mernih traka:

- velika tačnost merenja deformacija,
- mogućnost merenja statičkih i dinamičkih deformacija $\varepsilon(t) \neq \text{const.}$
- merenje deformacija u različitim radnim uslovima: vlažnost, temperatura, pritisak ...
- nema uticaja na mašinski deo.

Loše karakteristike mernih traka:

- merenje samo površinskih deformacija,
- relativno nizak nivo izlaznog signala, pa se isti mora pojačavati.

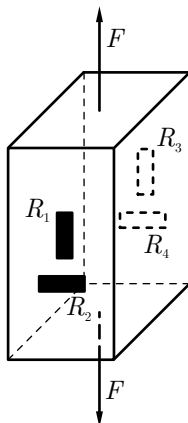
Mašinski deo napregnut na zatezanje

Na mašinski deo napregnut na zatezanje postavljene su četiri merne trake R_1 , R_2 , R_3 i R_4 . Dve su postavljene u pravcu dejstva sile (R_1 i R_3) i one mere uzdužne deformacije ε , a druge dve (R_2 i R_4) su postavljene normalno na taj pravac i one mere poprečne deformacije:

$$\varepsilon_p = -\nu \cdot \varepsilon.$$

U ovom slučaju dobija se maksimalno pojačanje mernog mosta:

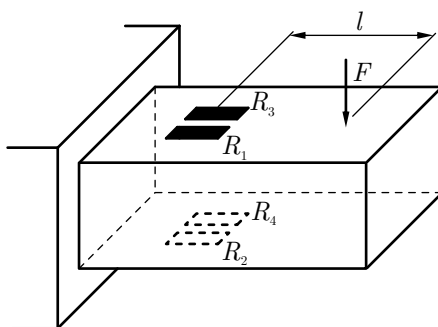
$$B = \varepsilon_1 + \varepsilon_3 + |\varepsilon_2| + |\varepsilon_4| = \varepsilon + \varepsilon + \nu \cdot \varepsilon + \nu \cdot \varepsilon = 2\varepsilon(1 + \nu).$$



Mašinski deo napregnut na savijanje

Ako je mašinski deo napregnut na savijanje usled dejstva sile F , kao što je prikazano na slici, gornja vlakna će se izdužiti, a donja sabiti. Deformacije u ovim vlaknima su istog intenziteta a suprotnog znaka. Saglasno ovome sledi izraz za faktor pojačanja mernog mosta:

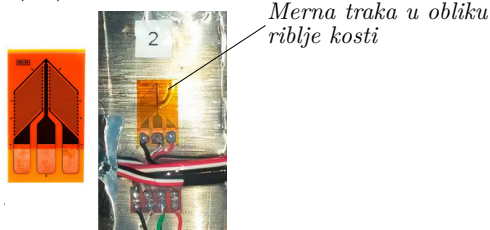
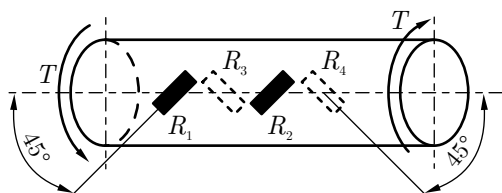
$$B = \varepsilon_1 + \varepsilon_3 + |\varepsilon_2| + |\varepsilon_4| = 4\varepsilon.$$



Mašinski deo napregnut na uvijanje

Na vratilo napregnuto na uvijanje postavljene su četiri merne trake R_1 , R_2 , R_3 i R_4 u pravcu maksimalnih deformacija koje leže pod uglom od 45° u odnosu na osu vratila. Napajanje mosta i izlazni signal prenose se sa vrtila koje se obrće preko kliznih prstenova ili bežičnim putem. Merne trake R_1 i R_2 izložene su istezanju, dok su merne trake R_3 i R_4 izložene sabijanju. Apsolutne vrednosti deformacija su iste. Saglasno ovome sledi faktor pojačanja mernog mosta:

$$B = \varepsilon_1 + \varepsilon_3 + |\varepsilon_2| + |\varepsilon_4| = 4\varepsilon.$$



Pošto je ugao od 45° teško izmeriti na cilindričnoj površini, za ovu svrhu se češće koriste specijalne merne trake u kojima je provodnik usmeren pod uglom $+45^\circ$ i -45° , tj. formira se par ovih traka u vidu "riblje kosti".