

OSNOVI MEHANIKE LOMA, 1. DIO: ZAČEĆE PUKOTINE

UVOD

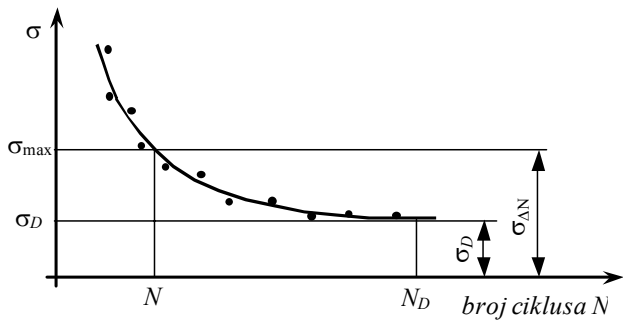
Kada su Sjedinjene Američke Države ušle u II. svjetski rat, pojavio se problem opskrbe Saveznika, koji nisu bili dovoljno pripremljeni za rat i nedostajalo im je svega, prvenstveno naoružanja. Trebalo je hitno izgraditi flotu, koja će obaviti ovaj zadatak. Odmah je napravljen projekt i pristupilo se izgradnji. Sveukupno je proizvedeno 2.700 (istih!) brodova, poznatih pod imenom *Liberty*. No, ovi brodovi nisu imali sreću! Iako su plovili u velikim konvojima i imali pratnju (uglavnom) britanskih ratnih brodova, bili su laka i masovna meta njemačkih podmornica. Od oko 400 brodova proizvedenih 1941.g. samo ih je dvadesetak dočekalo kraj rata! Ali, nisu svi stradali od njemačkih podmornica: Od svih proizvedenih brodova, približno 400 ih je doživjelo lom zbog zamora materijala, od čega 90 katastrofičan lom. U deset slučajeva brodovi su se prelomili na dva dijela. To je bio znak akademskoj zajednici, ali i stručnjacima u praksi, da ulože napore u rješavanju ovog problema. Tako je rođena Mehanika loma, znanstvena disciplina koja proučava uvjete začeca pukotine, njenog širenja i konačnog loma zbog zamora materijala.

Danas Mehanika loma proživljava svoje zlatno doba, te predstavlja snažan i nezamjenjiv alat u rukama kako projekatnata strojarskih, brodskih, građevinskih, off-shore i arhitektonskih konstrukcija, tako i inženjera u pogonu. Zato će autor ovog članka- u tri uzastopna broja ovog časopisa- namijenjenog prvenstveno inženjerima u brodskom pogonu, obraditi tematiku Mehanike loma kao dijela šireg područja Pogonske čvrstoće, u četiri dijela: U ovom, prvom dijelu, sažeto će se obraditi osnove Pogonske čvrstoće zajedno sa problematikom začeca zamorne pukotine. U drugom dijelu bit će opisani uvjeti i zakoni širenja zamorne pukotine. U trećem dijelu, opisat će se načini i metode zaustavljanja širenja pukotine, dok će u četvrtom dijelu biti prikazana najnovija dostignuća Pogonske čvrstoće i Mehanike loma.

POGONSKA ČVRSTOĆA DO POJAVE MEHANIKE LOMA

Već na prijelazu iz 19. u 20. stoljeće zapaženo je da se dijelovi stroja ili konstrukcije podvrgnuti vremenski promjenjivim opterećenjima, lome pri naprezanjima znatno manjima od statičke čvrstoće materijala, za razliku od lomova pri statičkom opterećenju- redovito bez prethodnog razvlačenja materijala- bez obzira na vrstu i osobine materijala i na vrstu naprezanja. Problem je bio osobito izražen kod lomova vagonskih osovina njemačkih državnih željeznica, tim više što su lomovi nastajali kod naprezanja višestruko manjih negoli je statička čvrstoća, i to pri statičkom opterećenju! Problema se prihvatio i uspješno ga riješio inženjer Wöhler, koji je ustanovio:

- da su osovine, i pored statičkog opterećenja, napregnute vremenski promjenjivim naprezanjima, jer svaka točka kritičnog presjeka, zbog rotacije, prolazi kroz područja maksimalnog vlačnog, pa preko nule do isto takvog tlačnog naprezanja, pa prema tome čini cikluse naizmjenično-promjenjivog naprezanja.
- da ova promjenjiva naprezanja uzrokuju stvaranje i širenje pukotine, što je nazvao zamorom materijala. Ovaj proces zamaranja traje sve do konačnog loma, koji nastupa kada preostali presjek, nezahvaćen pukotinom, postane toliko malen da nastaje njegov statički lom. Zbog toga lomna površina uvijek ima dvije izražene zone: zonu širenja pukotine kao izrazito glatku zonu (hrapavost je na nivou veličine kristalnih zrna), te grubo hrapavu zonu nasilnog, statičkog loma.
- da je trajnost osovina, izražena u broju doživljenih ciklusa naprezanja tim veća što je nivo naprezanja manji. Pri tome postoji vrijednost maksimalnog naprezanja ciklusa za koju je trajnost praktički neograničena. Ova vrijednost nazvana je trajnom dinamičkom čvrstoćom. Opisana ovisnost dana je tzv. Wöhlerovom krivuljom, (Sl. 1), čiji analitički izraz glasi:



Slika 1 - Wöhlerova krivulja dinamičke čvrstoće

$$\sigma_{\max}^m N = \sigma_D^m N_D = C$$

gdje su C i m konstante materijala, $\sigma_{\max} = \sigma_{DN}$ je maksimalno naprežanje ciklusa, tj. dinamička čvrstoća za određeni broj ciklusa N , dok je σ_D trajna dinamička čvrstoća. Daljnjim istraživanjima ja ustanovljeno da ovaj izraz vrijedi za sve materijale, za svaku vrstu naprežanja, te za svaki ciklus, inače definiran koeficijentom asimetrije ciklusa $r = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$. Tako je postalo moguće u svakoj prilici odrediti najveći nivo naprežanja da bi vijek trajanja bio jednak ili veći od unaprijed zadanog- određenog projektnim zadatkom, ili pak odrediti vijek trajanja elementa stroja ili konstrukcije za poznato opterećenje. No, za to je potrebna Wöhlerova krivulja, a za dobiti nju su potrebna dugotrajna i skupa testiranja. Zato se na osnovi samo jedne (eventualno dvije) Wöhlerove krivulje (obično za $r=-1$ i (ili) $r=0$) konstruira tzv. Smithov dijagram (Sl. 2), iz kojeg je moguće

odrediti dinamičku čvrstoću za bilo koje srednje naprežanje, tj. za vremenski promjenjiva naprežanja s proizvoljnom asimetrijom ciklusa.

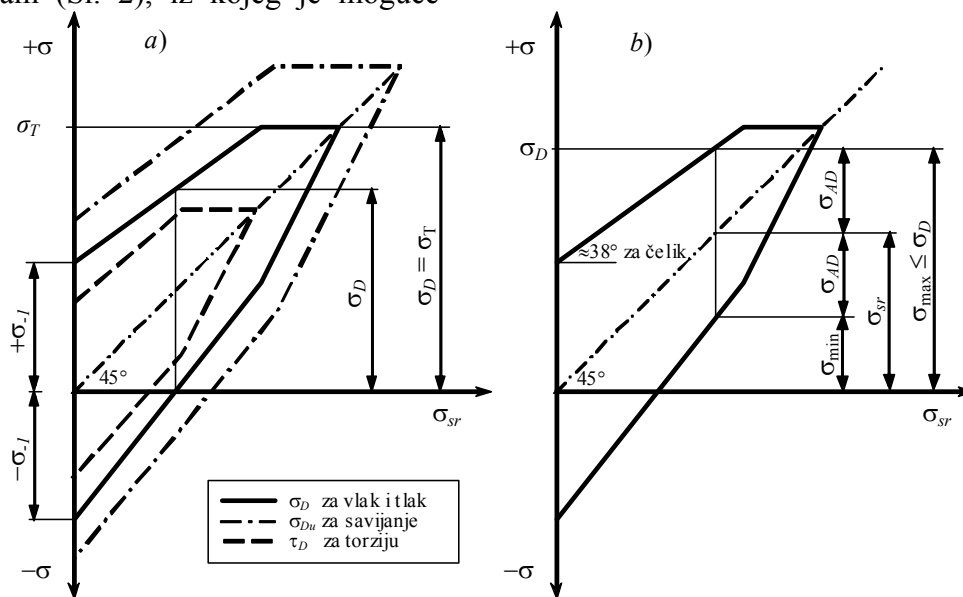
Pokazalo se da ova saznanja nisu bila dovoljna za pouzdano konstruiranje protiv loma uslijed zamora. Naime, najveći dio konstrukcija je u praksi izložen opterećenjima promjenjive amplitude. Napori uloženi u pronalaženje pogodne teorije, koja bi omogućavala pouzdanu procjenu čvrstoće i vijeka trajanja elemenata strojeva i konstrukcija tako opterećenih, urodili su poznatom Palmgren-Minerovom teorijom linearnog gomilanja oštećenja uslijed zamora, koja glasi

$$\sum_i \frac{n_i}{N_i} = D,$$

gdje je n_i broj ciklusa pri maksimalnom naprežanju σ_i , N_i je broj ciklusa do loma tj. trajnost za nivo naprežanja σ_i , i je broj blokova naprežanja konstantna amplitude, dok je $D=0,5 \dots 5,0$ konstanta dobivena eksperimentalno, čija je izvorna vrijednost bila jednaka jedinici. Ova formula vodi do izraza za ekvivalentno naprežanje konstantne amplitude

$$\sigma_e = \sqrt[m]{\sum_i \alpha_i \sigma_i^m},$$

koja je potvrđena i eksperimentalno. U ovoj



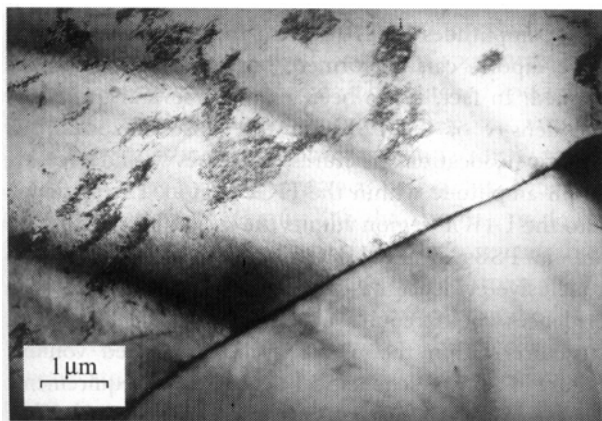
Slika 2 - Smithov dijagram trajne dinamičke čvrstoće) dijagrami za različite vrste napreznja b) način određivanja dinamičke čvrstoće. Sa σ_{-1} označena je trajna dinamička čvrstoća pri asimetriji ciklusa $r=-1$.

formuli je m eksponent Wöhlerove krivulje, a $\alpha_i = n_i / \sum n_i$ je relativna frekvencija (ili vjerojatnost) pojavljivanja napreznja σ_i .

Ova i druga saznanja očitno nisu bila dovoljna da spriječe katastrofu *Libertyja*. No, ni Mehanika loma, koja se primarno bavi uvjetima i zakonima širenja pukotine, sama po sebi nije dovoljna za rješenje problema određivanja graničnih napreznja i vijeka trajanja komponenti. Naime, dobar dio vijeka trajanja, a na nivou trajne dinamičke čvrstoće- praktički čitav vijek trajanja, sastoji se od vremena potrebnog za začecje pukotine! Metodika određivanja ovog vremena, eksperimentalna ili računaska, uglavnom ne spada u uže područje Mehanike loma, pa će posebno biti obrađena u ovom članku.

ZAČEĆE PUKOTINE

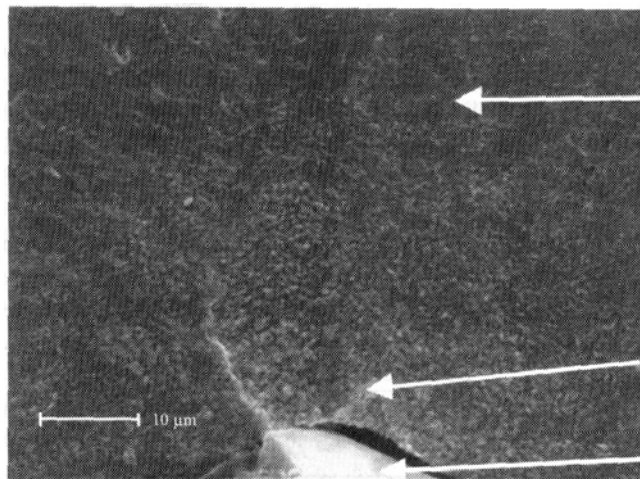
Proces začecja pukotine započinje cikličkim gomilanjem plastičnih deformacija na mjestima mikrokoncentracije napreznja, čiji su izvori najčešće na površini napregnutog elementa i to pri dnu udubina površinskih neravnina, u okolini oksida koji djeluju kao strano tijelo (uključina), te na mjestima svih ostalih nehomogenosti izazvanih okolišem i obradom (npr. gubitak ugljika pri kovanju ili uključine pri ljevanju). Važan uzrok začecja pukotine na površini jest i činjenica da su nominalna napreznja uvijek najveća na površini. Oko kristalnih zrna s ovako nagomilanim plastičnim deformacijama formiraju se klizne ravnine, najčešće na granici sa nedeformiranim zrnima (Sl. 3). Daljnja ciklička opterećenja uzrokuju i samo klizanje- početak rasta kratkih (mikro)pukotina.



Slika 3 – Formirana klizna ravnina na granici plastično i elastično deformiranog zrna

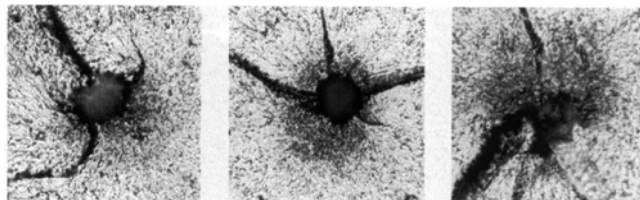
Ovo se lijepo vidi na Sl. 3, gdje je lijevo-gore od mikropukotine zrno niskougljičnog čelika s plastičnim deformacijama tj. dislokacijama, a desno-dolje zrno praktički bez dislokacija. Gore desno se vidi ishodište buduće pukotine na dnu površinske neravnine.

Kada je izvor pukotine pod površinom, onda je to isključivo na mjestima uključina (Sl. 4) ili kaverni. Kod sivog lijeva začecje pukotine je redovito na kraju grafitnog listića, koji je dio njegove strukture i predstavlja koncentrador napreznja.



Slika 4 - Tvrdna uključina kao izvor ispodpovršinskog začecja pukotine kod Cr-Mo čelika ASTM A295

Izvor pukotine može biti i mekana intergranularna zona u kojoj se formira tzv. trostruka točka od koje se iniciraju tri mikropukotine- svaka u svome smjeru (Sl. 5).

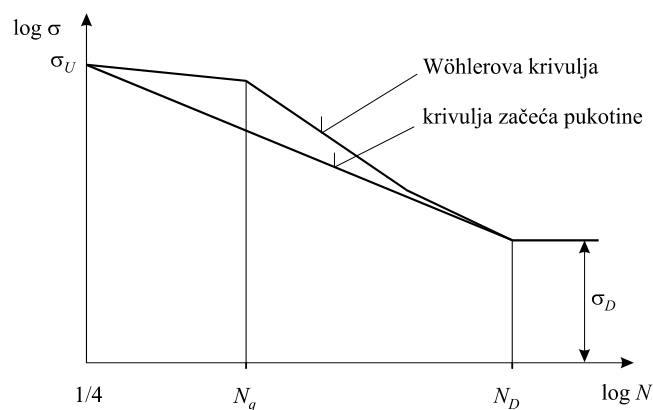


Slika 5 - Tri primjera trostrukog začecja mikropukotina na jednom izvoru kod Cr-Mo čelika ASTM A295

Dakle, u zoni najvećih naprezanja može se začeti nekoliko mikropukotina, ali samo jedna od njih nastavlja se širiti do makro razmjera i do konačnog loma. Da li će se mikropukotina nakon začeca nastaviti širiti ili ne, ovisi o vrijednosti raspona faktora intenziteta naprezanja za začetu duljinu pukotine- o tzv. pragu širenja pukotine. Ova vrijednost, pored visine naprezanja i veličine mikropukotine, ovisi i o obliku i materijalu elementa, te o karakteristikama pukotine, a o njoj će biti više govora u članku o širenju pukotine. Ovdje ćemo kazati samo da se za dubinu inicijalne (začete) pukotine uzima dimenzija kristalnog zrna, koja je kod različitih materijala različita, ali red njezine veličine je 0,05 mm.

Budući da vrijeme potrebno za začecanje pukotine čini veliki dio vremena do zamornog loma, važno ga je znati odrediti, kako u fazi projektiranja, tako i u fazi eksploatacije i održavanja. Ono se najčešće određuje pomoću prikazane formule Wöhlerovog tipa, čije se konstante za process začeca određuju testiranjem na umaralici: Epruveta ili strojni dio se izlože cikličkim opterećenjima, pa se nakon određenog broja ciklusa, s posebnom opremom (elektronski mikroskop, ultrazvuk, snop elektrona, laser) pažljivo promatra da li je začeta pukotina, tj. da li postoji mikropukotina duljine barem jednake npr. 0,05 mm. Rezultati se unose u σ - N dijagram, a dobivena krivulja, koja se nalazi ispod Wöhlerove krivulje (osim u točki (N_D, σ_D)), dijeli sve točke u kojima je začeta pukotina, od onih u kojima nije začeta. Ova krivulja naziva se krivuljom začeca pukotine, a slično kao i Wöhlerova krivulja, služi za formiranje odgovarajuće krivulje začeca za cikluse sa proizvoljnom asimetrijom u Smithovom dijagramu.

Krivulju začeca (inicijacije) pukotine u σ - N dijagramu s logaritamskim koordinatama aproksimirao je autor ovog članka kao pravac, koji se sa krivuljom zamaranja spaja u dvije karakteristične točke u kojima je vrijeme do začeca jednako vremenu do loma: na "koljenu" Wöhlerove krivulje i u točki $N=1/4$ (statički lom) – Sl. 6.



Slika 6 – Krivulja začeca pukotine i Wöhlerova krivulja

Ova aproksimacija dobro se slaže s rezultatima ispitivanja i naišla je na zapaženu reakciju u znanstvenim krugovima.

(Nastavak u slijedećem broju)