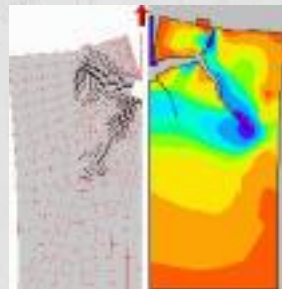


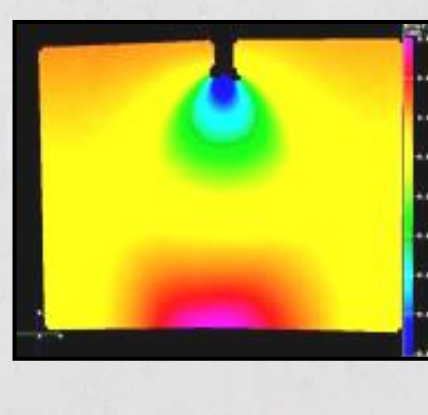
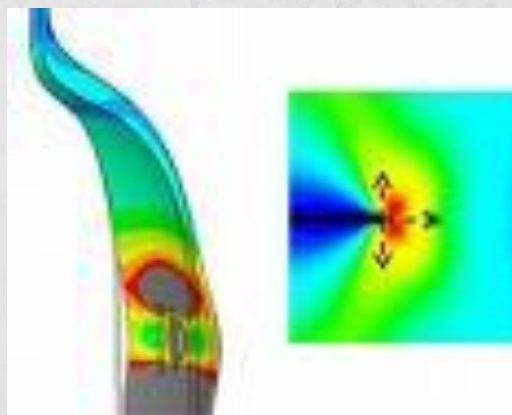
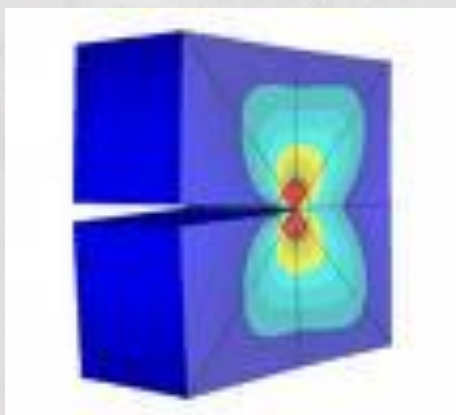
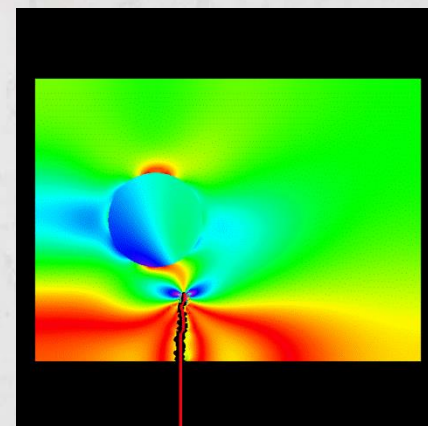
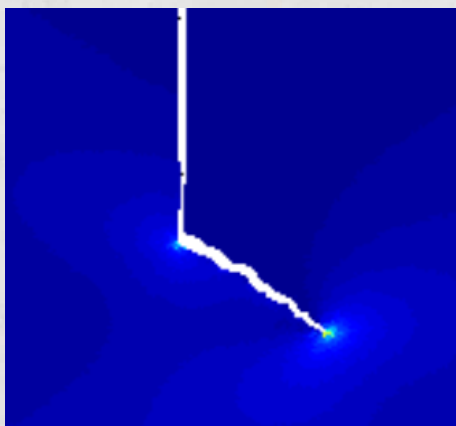
MEHANIKA LOMA



DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ GRAĐEVINARSTVA

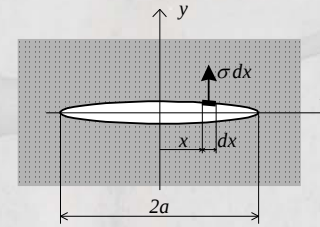
Smjerovi: **TEORIJA I MODELIRANJE KONSTRUKCIJA I MATERIJALI**

MEHANIKA LOMA



• MEHANIKA LOMA – ML

(FRACTURE MECHANICS – FM)

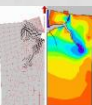


- **znanstvena disciplina relativno novijeg datuma** jer su se ozbiljniji radovi iz ovog područja pojavili početkom XX. stoljeća
- posebna grana **mehanike deformabilnog tijela** koja analizira raspodjelu naprezanja u okolišu pukotine i drugih linijskih defekata
- definira **kriterije za nastanak pukotine** i **uvjete njezinog daljnjeg nestabilnog ili stabilnog širenja**.

Proces loma sastoji se od dvaju stadija:
pojave i razvoja pukotine.

Prvi uvjet za pojavu pukotine je **dosezanje graničnog stanja** u kritičnoj točki tijela ili tijela u cjelini (klasične teorije čvrstoće),

a **razvoj pukotine** polazi od toga da u tijelu **već postoje pukotine** ili **sustav pukotina** i **definira se kriterij za početak proširivanja**.

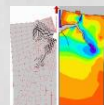


UVOD

Pri proučavanju problema naprezanja i deformacija, pri različitim oblicima opterećenja, moraju se definirati **uvjeti koji moraju biti ispunjeni pri dimenzioniranju sastavnih dijelova konstrukcije i samih konstrukcija**

Ti uvjeti su:

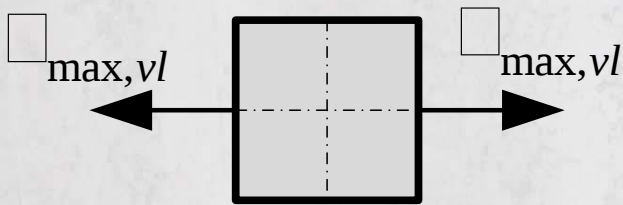
1. UVJET ČVRSTOĆE
2. UVJETI KRUTOSTI
3. UVJETI STABILNOSTI



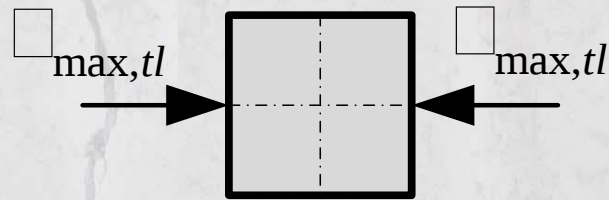
1. UVJETI ČVRSTOĆE

Temelji se na metodi dopuštenih naprezanja (teorija elastičnosti)

Kod **jednoosnog stanja naprezanja**:



$$\sigma_{\max, vl} \leq \sigma_{dop, vl}$$

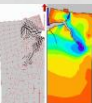


$$\sigma_{\max, tl} \leq \sigma_{dop, tl}$$

$$\sigma_{dop} = \frac{\sigma_K}{k}$$

$$\sigma_K = \sigma_T$$

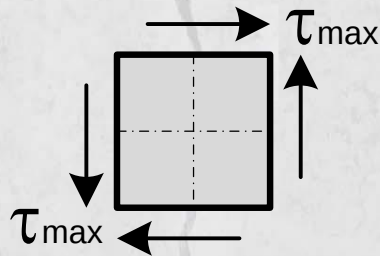
$$\sigma_K = \sigma_M$$



1. UVJETI ČVRSTOĆE

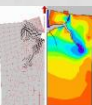
Metoda dopuštenih naprezanja (teorija elastičnosti)

Kod **stanja čistog posmika**:



$$\tau_{\max} \leq \tau_{dop}$$

$$\tau_{dop} = \frac{\tau_K}{k}$$

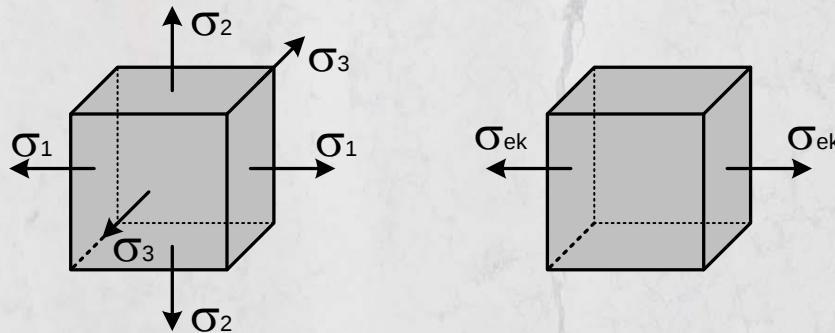


1. UVJETI ČVRSTOĆE

Metoda dopuštenih naprezanja, teorija elastičnosti

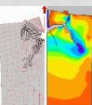
Kod **višeosnog stanja naprezanja**:

Uvode se **teorije čvrstoće** (**teorije graničnih stanja**) koje na osnovu **mehaničkih svojstava materijala pri jednoosnom stanju naprezanja prognoziraju mehanička svojstva pri višeosnom stanju naprezanja.**



$$\sigma_{ek} = f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \dots)$$

$$\sigma_{ek} \leq \sigma_{dop}$$



2. UVJETI KRUTOSTI

Kriterij dopuštenih deformacija, teorija elastičnosti

PROGIB

$$f_{\max} \leq f_{\text{dop}}$$

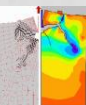
KUT ZAOKRETA

$$\varphi_{\max} \leq \varphi_{\text{dop}}$$

3. UVJET STABILNOSTI

Kod elemenata opterećenih na tlak

$$F_{\max} \leq F_{kr}$$



I pored toga **u praksi je dolazilo ili dolazi do rušenja pojedinih građevina bez obzira što si bili zadovoljeni svi prethodni uvjeti.**

Do loma je najčešće dolazilo u slučaju **krhkih** i **visokokvalitetnih materijala**.



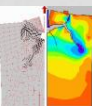
Stvarna čvrstoća materijala je **nekoliko desetaka puta manja** od **teorijske čvrstoće** koja odgovara molekularnim silama.

Razlog tome su **defekti** u svakom materijalu i na svim razinama:

- **posljedice lošeg projektiranja**
- **na mjestima koncentracije naprezanja**
- **oštećenja zbog zamora materijala**
- **oštećenja od korozije i dr.**

Djelovanje tih defekta je ekvivalentno djelovanju zareza odnosno pukotina.

Ti **defekti, odnosno pukotine, uzrokuju koncentraciju naprezanja u vrhovima što dovodi do širenja pukotine**, a konačno i do loma elementa konstrukcije.

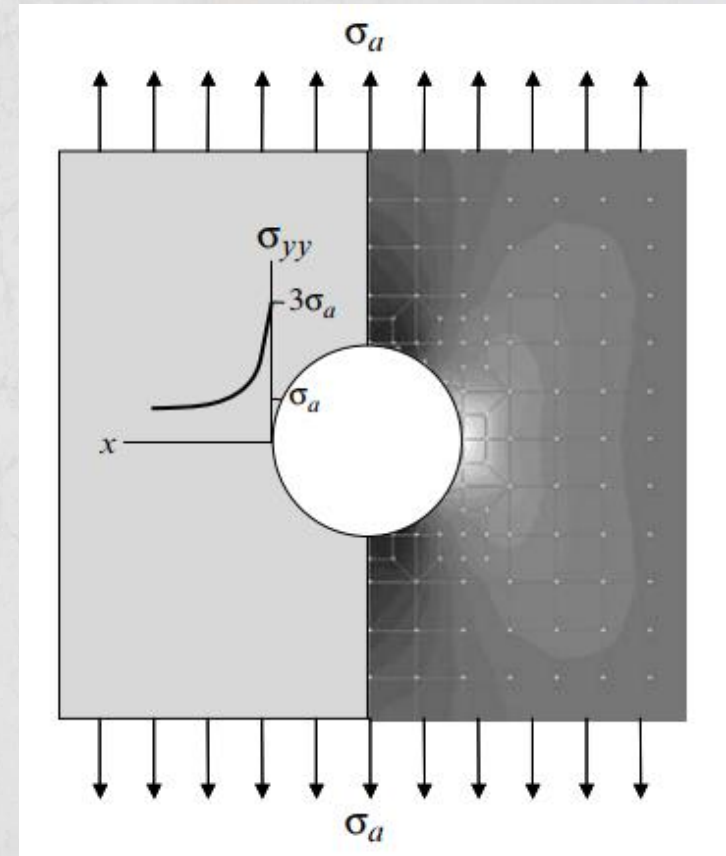


Kada dolazi do širenja pukotine u nekom elementu?

- nakon što naprezanje u elementu konstrukcije dostigne za neku pukotinu **kritičnu vrijednost**.

To naprezanje ovisi o:

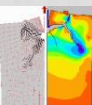
- **dimenzijama pukotine**
- **orijentaciji pukotine** u odnosu na smjer opterećenja
- **fizikalno-mehaničkim svojstvima materijala**.



U mehaniku loma se **uvode nove veličine koje su opisuju ponašanje materijala pri pojavi pukotina.**

To su **parametri mehanike loma:**

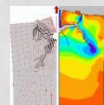
- **koeficijent intenziteta naprezanja K** (*stress intensity faktor*)
- kritična veličina koeficijenta intenziteta naprezanja -
žilavost loma K_c (*fracture toughness*)
- **energija loma G_F**
- **žilavost materijala G_C**
- **otvaranje pukotine u korijenu $CTOD$** (*Crack Tip Open Displacement*)
- **kritična duljina pukotine a_c**
- konturni **J -integral** *Rice-a* i dr.



Prema tome, ML predstavlja znanstvenu disciplinu u kojoj je neizbježno povezivanje **teorijskih analiza** sa rezultatima **eksperimentalnih istraživanja**.

Klasičan pristup nauke o čvrstoći uzima u obzir činjenicu da naprezanja u blizini otvora, utora i sličnih geometrijskih diskontinuiteta mogu prijeći granicu tečenja materijala. Pretpostavlja se da će se materijal jednostavno plastično deformirati i da će doći do preraspodjele naprezanja.

To često nije točno, jer kod mnogih materijala **ne dolazi do preraspodjele naprezanja**. Kad se oko pukotine u takvom materijalu pojave velike koncentracije naprezanja, **nastaje nestabilno širenje pukotine** koje dovodi do loma i kod veličine naprezanja koja je mnogo manja od granice tečenja materijala.



Zato se pri postojanju defekata (pukotina) koristi dodatni **uvjet osiguranja čvrstoće**. **Naprezanje u elementu ne smije prijeći veličinu:**

$$\sigma < \frac{\sigma_c}{k}$$

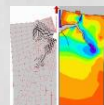
- gdje je:

σ_c - kritično naprezanje

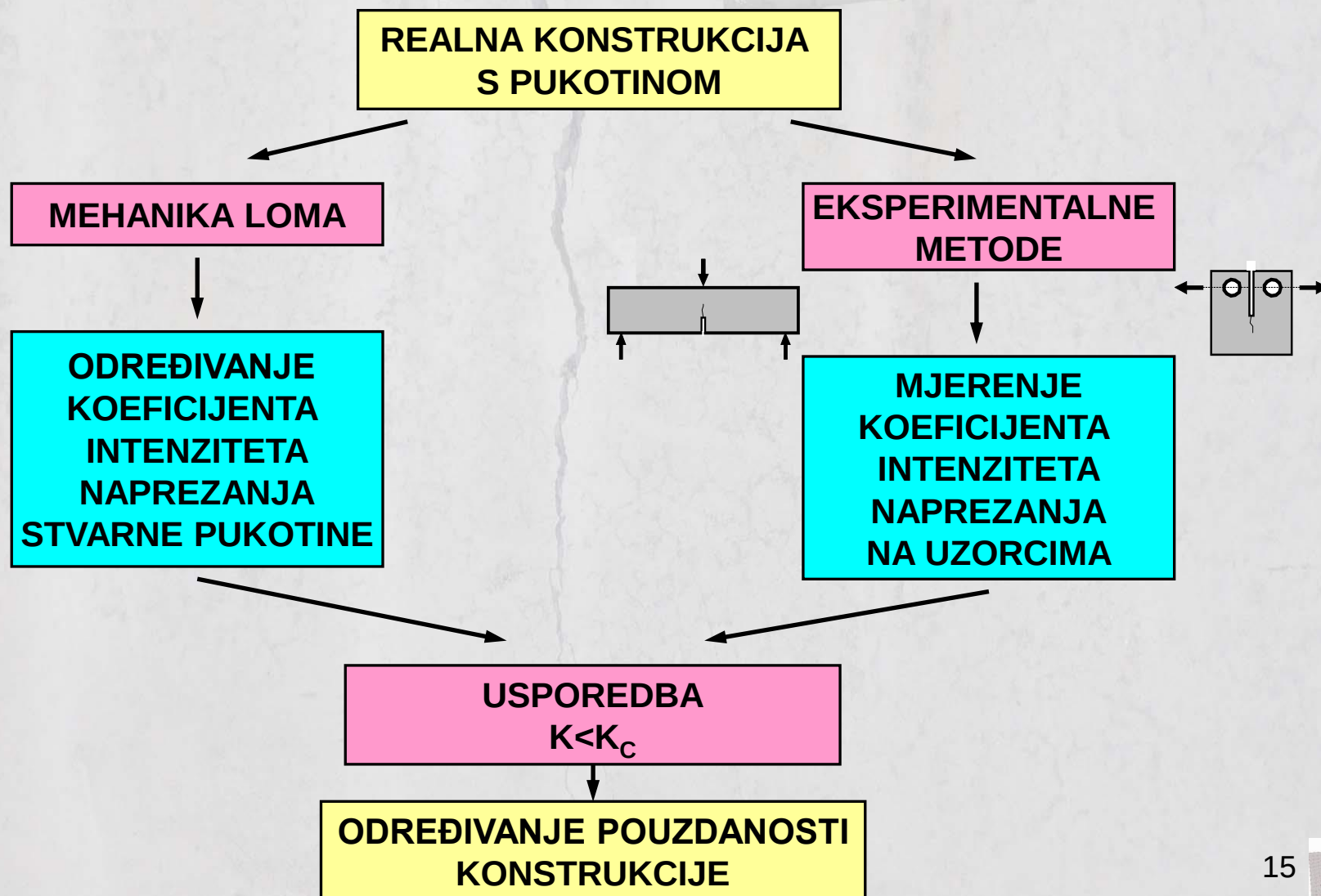
k - koeficijent sigurnosti koji je manji nego kod kriterija čvrstoće zato što je $\sigma_c < \sigma_M$

Prema tome koeficijent sigurnosti čvrstoće elementa s pukotinom određen je iz odnosa:

$$k = \frac{\sigma_c}{\sigma}$$



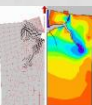
POSTUPAK ODREĐIVANJA POUZDANOSTI KONSTRUKCIJE PRIMJENOM MEHANIKE LOMA



Prema ponašanju materijala pod djelovanjem opterećenja mehanika loma se dijeli na:

- ☐ **Linearno elastičnu mehaniku loma – LEFM**
(*Linear Elastic Fracture Mechanics*)
- ☐ **Elasto plastičnu mehaniku loma – EPFM**
(*Elastic-Plastic Fracture Mechanics*)
- ☐ **Mehaniku loma iznad granice tečenja – PYFM**
(*Post Yield Fracture Mechanics*)
- ☐ **Dinamička mehanika loma – DFM**
(*Dynamic Fracture Mechanics ili Dynamic and Time-Dependent Fracture*)

Premda je lom uzrokovan mnogim faktorima poput plastičnosti, korozije, temperature, zamora materijala, tečenja itd., često se analiza loma orijentira na **linearno elastičnu mehaniku** loma tj. na **krhki lom**.



POVIJESNI PREGLED RAZVOJA MEHANIKE LOMA

U većini slučajeva **uzroke otkazivanja** neke konstrukcije moguće svrstati u jednu od sljedeće dvije kategorije:

- **Nepažnja** prilikom proračuna, izvedbe ili korištenja konstrukcije
- **Primjena novih materijala ili metoda proračuna** koji uzrokuju neočekivan i nepoželjan rezultat.

Prvi tip otkazivanja moguće je spriječiti određenim mjerama, dok u drugom slučaju treba naći pravi omjer napretka i opasnosti koje donose nepoznati materijali i postupci.

Oduvijek su se konstrukcije projektirale tako da se izbjegne lom !

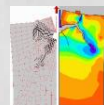
POVIJESNI PREGLED RAZVOJA MEHANIKE LOMA

Mnoge konstrukcije izrađene za vrijeme Faraona u antičkom Egiptu i Cezara u Rimu dokaz su sposobnosti tadašnjih arhitekata i inženjera.

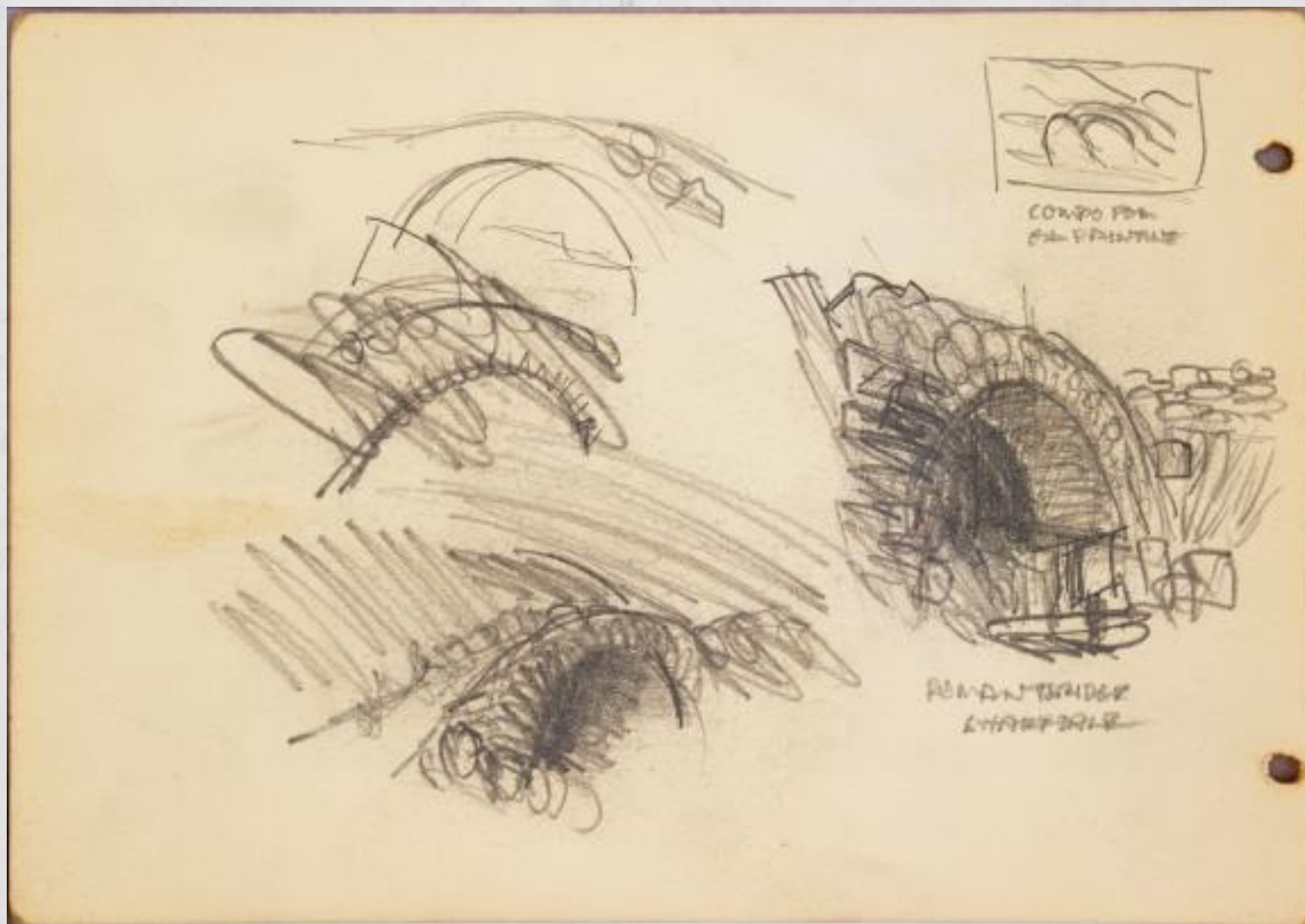
Te i druge građevine (zgrade i mostovi) još služe namijeni za koju su izgrađene i primjer su uspješnog projektiranja.

Prije **Isaaca Newtona** ljudi nisu poznavali mehaniku, pa se projektiranje temeljilo na **metodi pokušaja i pogrešaka**.

Rimski tzv. 'ispitivači' su zahtijevali da inženjer projektant novog mosta stoji ispod mosta za vrijeme probnog opterećivanja.



POVIJESNI PREGLED RAZVOJA MEHANIKE LOMA



POVIJESNI PREGLED RAZVOJA MEHANIKE LOMA

Sve do industrijske revolucije, izbor konstruktivnih materijala je bio ograničen na **drvo**, **opeku** i **mort** i većinom su rađene konstrukcije opterećene na tlak.

Dominantan oblik je bio luk (svodovi, prozori, mostovi) radi tlačnog prijenosa opterećenja, a bio je i estetski povoljan.



Rimski most u Siriji



Rimski most u blizini Scigliana (Italija)

POVIJESNI PREGLED RAZVOJA MEHANIKE LOMA



Gotička katedrala Kings College Chapel, Cambridge

(građena od 1446. do 1531. godine)

POVIJESNI PREGLED RAZVOJA MEHANIKE LOMA

Industrijska revolucija je donijela masovnu proizvodnju čelika i željeza, a time i vlačno opterećene konstrukcije.



Tower Bridge u Londonu završen 1894. godine
Primjer moderne gredne konstrukcije

POVIJESNI PREGLED RAZVOJA MEHANIKE LOMA

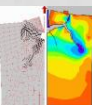
Međutim bilo je i problema, **konstrukcije su doživljavale lom i pri opterećenjima mnogo manjim od očekivane vlačne čvrstoće i ti su lomovi u početku smatrani slučajnima tj. nepredvidljivima.**

Jedan od najvećih katastrofa dogodila se u Bostonu u siječnju 1919. godine kada je došlo do loma čeličnog silosa za šećer.



Do loma je došlo iako je koeficijent sigurnosti u odnosu na vlačnu čvrstoću bio 10 ili veći.

Zaključeno je: **"Uzrok loma nije moguće utvrditi".**



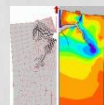
POVIJESNI PREGLED RAZVOJA MEHANIKE LOMA

Najranija kvalitativna istraživanja iz područja mehanike loma sežu čak nekoliko stoljeća unazad.

Već u XV. stoljeću, **Leonardo da Vinci** izvodio je prve pokuse na čeličnim žicama različite duljine i dovodio u vezu čvrstoću materijala i moguće postojanje pukotina. Ustanovio da čvrstoća ovisi o duljini žice, što je upućivalo na to da pogreške u materijalu utječu na njegovu čvrstoću (što je veći volumen materijala, veća je i vjerojatnost greške u materijalu).

Galileo Galilej je u svojim analizama tvrdio da ta otpornost zavisi samo od površine poprečnog presjeka, a ne i od dužine.

Analitički pristup Galileja i eksperimentalni da Vinchija ukazuju na potrebu paralelnog razvoja oba pristupa.



POVIJESNI PREGLED RAZVOJA MEHANIKE LOMA

Francuski fizičar **E. Mariotte** je oko 1650. godine konstruirao hidraulički sistem za napajanje fontana Versaja vodom pod pritiskom iz Sene.

Radi analize deformacija Mariot je ispitao prototip cilindrične posude.

Ustanovio je da do loma posude pod pritiskom dolazi kada opseg posude dosegne kritičnu veličinu i da postoji proporcionalna zavisnost između pritiska u posudi i deformacije opsega posude (što je **Robert Hook** znatno kasnije definirao svojim zakonom).

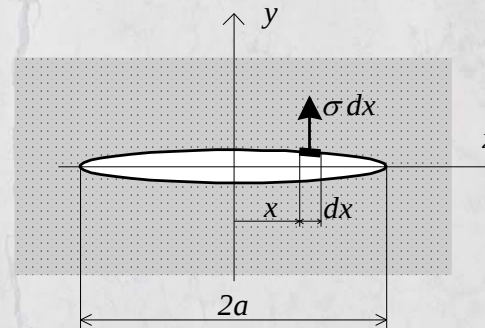


POVIJESNI PREGLED RAZVOJA MEHANIKE LOMA

Prvu kvantitativnu **vezu između čvrstoće materijala i veličine pukotine** objavio je **Alan Arnold Griffith** u svom radu 1920. godine.

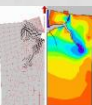
Primjenom analize naprezanja oko eliptičnog otvora **proučavao je nestabilno širenje** pukotine, te postavio teoriju loma.

Na uzorcima od stakla Griffith je pokazao da se za **idealno krhke materijale** može dobiti ispravna veza između čvrstoće materijala i veličine pukotine.



Alan Arnold Griffith (1893-1963)

“The phenomena of rupture and flaw in solid”



POVIJESNI PREGLED RAZVOJA MEHANIKE LOMA

Slična razmatranja sedam godina ranije provodio je i **Inglis**.

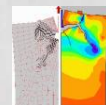
Tek tridesetak godina kasnije (1948. godine) Griffithov model doživio je preinake koje su omogućile njegovu primjenu i na uzorcima od metala.

Povećanjem primjene metala u konstrukcijama **povećava se i učestalost lomova**.

Zabilježeni su brojni slučajevi pojave loma, a neki od njih su završili sa katastrofalnim posljedicama.

Postavilo se pitanje:

Da li do lomova dolazi zbog loših konstrukcijskih rješenja ili zbog grešaka u materijalu ?



POVIJESNI PREGLED RAZVOJA MEHANIKE LOMA

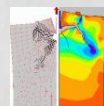
Razvoju mehanike loma kao inženjerske discipline u velikoj su mjeri doprinijeli događaji tijekom Drugog svjetskog rata.

Tada je u SAD – u razvijen revolucionaran **postupak zavarivanja** kojim je omogućena brža proizvodnja čeličnih ratnih brodova.

Tradicionalne konstrukcije koje su do tada bile zakovane, zamijenjene su potpuno zavarenim trupovima.

Novi **period učestalih lomova počinje pojavom zavarenih konstrukcija**, a posebno zanimanje za pručavanje problema loma počelo je nakon čestih lomova brodova tipa "*Liberty*" i tankera sličnog tipa koji su proizvedeni u SAD prije i tijekom drugog svjetskog rata.

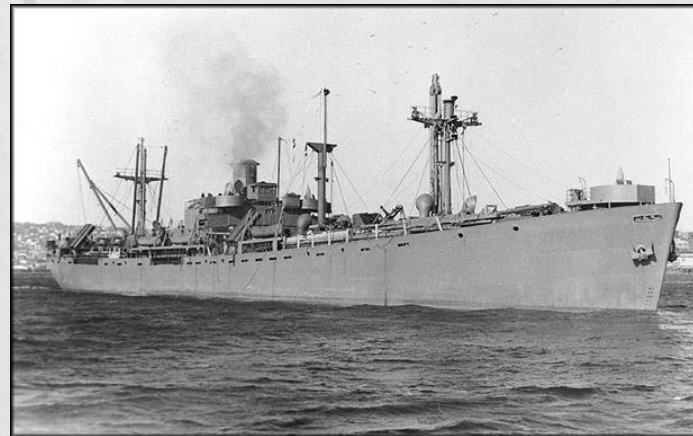
Od 2700 brodova tog tipa proizvedenih tijekom II. svjetskog rata 400 je pretrpjelo teške lomove, a njih 20 se doslovno slomilo na dva dijela.



POVIJESNI PREGLED RAZVOJA MEHANIKE LOMA

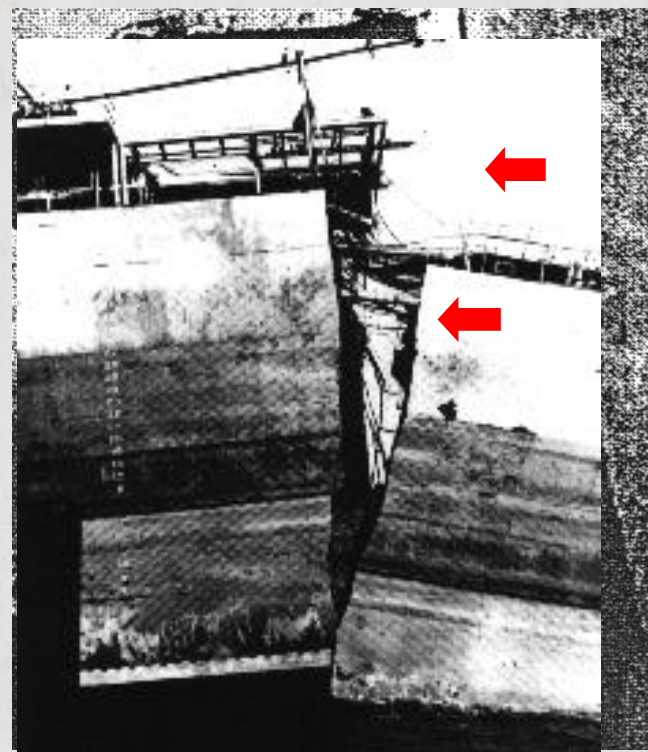
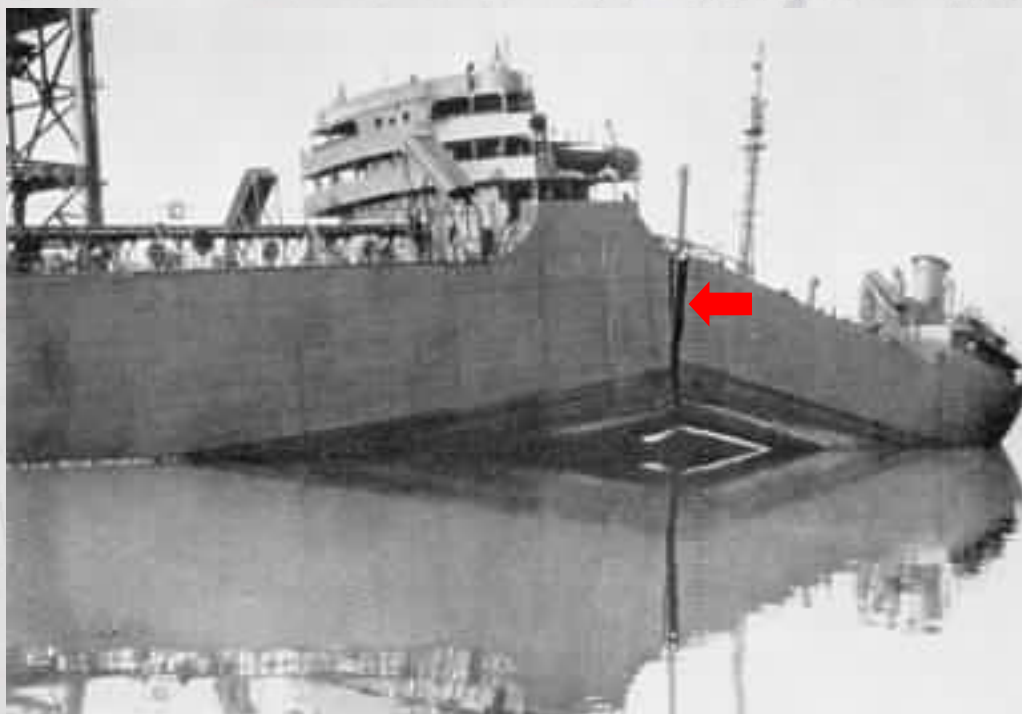
Do lomova je dolazilo i kod vrlo niskog nivoa naprezanja, što ih je činilo neobjašnjivim.

Brodovi su se lomili i usidreni u luci pri relativno mirnom vremenu.



Takvi lomovi, u tom razdoblju, su se događali i na drugim konstrukcijama (mostovi, stupovi, cjevovodi, rezervoari, posude pod tlakom i sl.). Oni su bili poseban izazov za istraživače, pa se velik broj znanstvenika upušta u analizu problema loma.

- Završne faze loma brodova tipa “*Liberty*”



POVIJESNI PREGLED RAZVOJA MEHANIKE LOMA

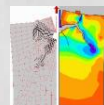
Neke od ovih nesreća uzrokovane su lošim dimenzioniranjem, ali su istraživanja pokazala da je kod većine ovih konstrukcija:

1. Na mjestu loma postojala je **greška tipa pukotine**
2. Lomovi su se događali na mjestima **velike koncentracije naprezanja**
3. Lomovi su bili **krhki**, s **vrlo malom plastičnom deformacijom**.

Današnja proizvodnja i procesi oblikovanja, mogu spriječiti stvarni krhki lom zavarenih čeličnih konstrukcija osiguravanjem prikladno niskih prijelaza temperature.

Tako su i ugrađena naprezanja u tim konstrukcijama manja.

Porastom upotrebe materijala visoke čvrstoće, zbog smanjenja težine nosive konstrukcije, uočeno je, iako se ne radi o krhkim materijalima, da im treba vrlo mala količina energije za lom.



POVIJESNI PREGLED RAZVOJA MEHANIKE LOMA

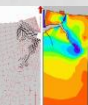
Poučeni ovim havarijama inženjeri tog doba počeli su **koristiti čelike veće žilavosti uz strogu kontrolu kvalitete varenja**.

Posebno se moraju spomenuti istraživanja Naval Research Laboratory (NRL) u Washingtonu koja su inicirala razvoj nove znanstvene discipline – **MEHANIKE LOMA**.

Na čelu istraživačke grupe u NRL-u bio je Georg R. Irwin, koji je proširio Griffithovu teoriju na metale.



Georg R. Irwin (1907-1998)



POVIJESNI PREGLED RAZVOJA MEHANIKE LOMA

On je pokazao da se naprezanje i pomaci blizu vrha pukotine mogu prikazati pomoću jedinstvene konstante koja je u vezi s brzinom oslobađanja energije.

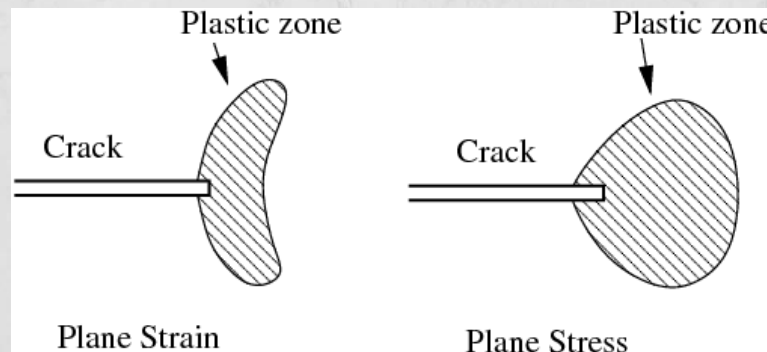
Taj je parametar kasnije poznat kao:

FAKTOR INTENZITETA NAPREZANJA

Do 1960. godine postavljene su osnove

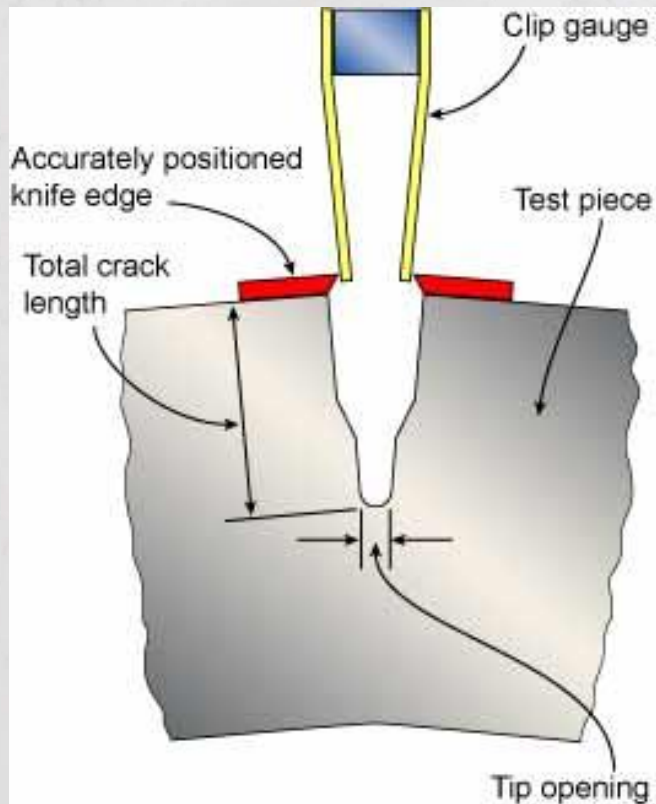
linearno - elastične mehanike loma (LEFM)

Nakon toga pažnja se usmjerava na proučavanje **plastičnosti vrha pukotine**. Irwinova korekcija plastične zone je relativno jednostavno proširenje LEFM.



POVIJESNI PREGLED RAZVOJA MEHANIKE LOMA

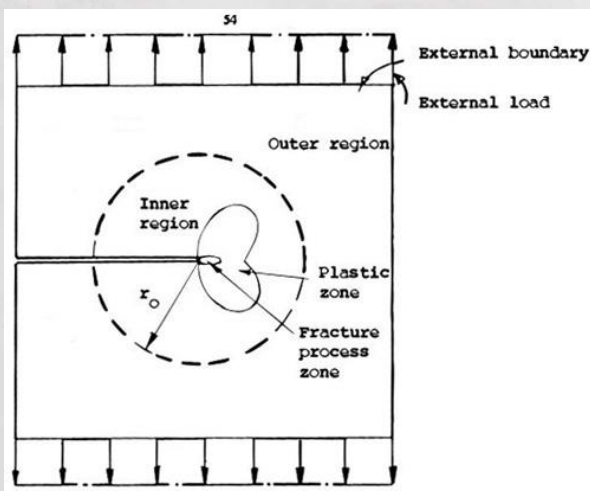
Wells je istraživanjem došao do alternativnog kriterija loma, uveo je **parametar CTOD** – Crack Tip Opening Displacement (Otvaranje vrha pukotine).



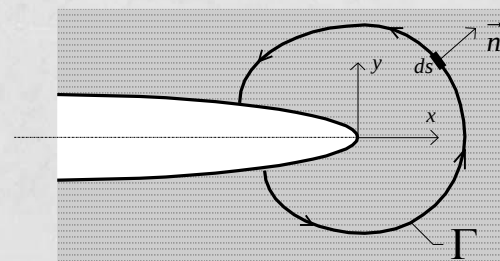
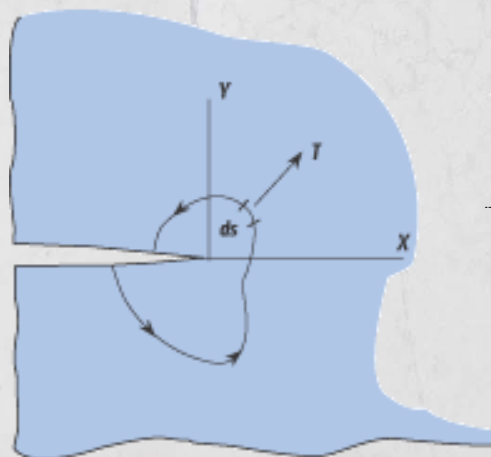
POVIJESNI PREGLED RAZVOJA MEHANIKE LOMA

U Americi **Rice** 1968. godine dolazi do **novog parametra koji karakterizira nelinearnost materijala pri vrhu pukotine**. Nelinearna brzina oslobađanja energije može se prikazati linijskim integralom po proizvoljnoj konturi u blizini pukotine koji se zove **J integral**.

Iste godine su Hutchinson, Rice i Rosengren povezali J integral s poljem naprezanja vrha pukotine kod nelinearnih materijala. Pokazali su da J integral nije samo brzina oslobađanja energije već i **nelinearni faktor intenziteta naprezanja**.



J -Integral conditions



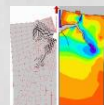
POVIJESNI PREGLED RAZVOJA MEHANIKE LOMA

Zahvaljujući naglom razvoju nuklearne industrije U SAD-u 70-tih godina XX. stoljeća dolazi do još aktivnijeg istraživanja na polju mehanike loma.

Ta istraživanja su bila vrlo uspješna i rezultirali su uvođenjem normiranih postupaka ispitivanja metala:

ASTM E1290 - 08 Standard Test Method for Crack-Tip Opening Displacement (CTOD) Fracture Toughness Measurement

ASTM E399- 09 Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness K_{IC} of Metallic Materials

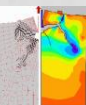


POVIJESNI PREGLED RAZVOJA MEHANIKE LOMA

- **15. stoljeće** *Leonardo de Vinchi i Galileo Galilej*
- **17. stoljeće francuski fizičar E. Mariotte**
- **1920. godine Alan Arnold Griffith**
- **1957. godine G. R. Irwin**
- **Razvoj metoda matematičke analize, posebno Mehanike kontinuuma**
- **Povećanje primjene metala u konstrukcijama**
- **Učestali lomovi brodova tipa “Liberty”, tankera i drugih konstrukcija**



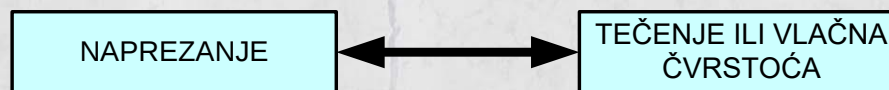
Alan Arnold Griffith



ODREĐIVANJE POUZDANOSTI KONSTRUKCIJA PRIMJENOM MEHANIKE LOMA

Tradicionalni pristup određivanja pouzdanosti sastojao se u uspoređivanju primijenjenog naprezanja i čvrstoće materijala.

Materijal je u tom slučaju adekvatan ako je njegova čvrstoća veća od naprezanja. Krhki lom se izbjegava uporabom faktora sigurnosti za naprezanje i zahtjeva za minimalnim vlačnim izduženjem materijala.



a) Pristup pomoću čvrstoće materijala

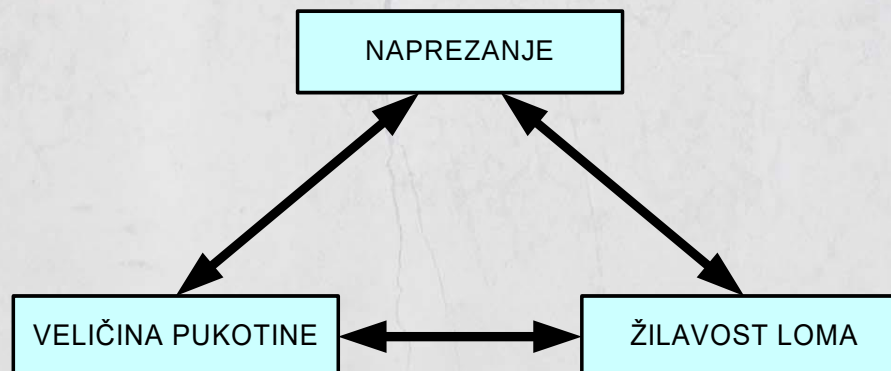
ODREĐIVANJE POUZDANOSTI KONSTRUKCIJA PRIMJENOM MEHANIKE LOMA

Pri korištenju mehanike loma pri određivanju pouzdanosti konstrukcija određivanja pouzdanosti uključuju se tri varijable.

Uvodi se dodatna varijabla - veličina pukotine, a žilavost loma zamjenjuje čvrstoću materijala



a) Pristup pomoću čvrstoće materijala

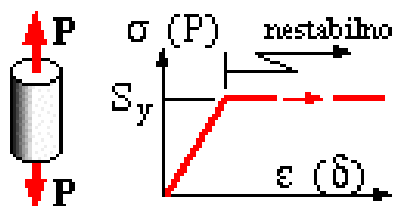


b) Pristup pomoću mehanike loma

ODREĐIVANJE POUZDANOSTI KONSTRUKCIJA PRIMJENOM MEHANIKE LOMA

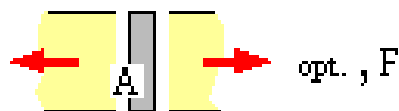
TRADICIONALNI PRISTUP ODREĐIVANJA POUZDANOSTI

Ponašanje uzoraka
prilikom ispitivanja



Karakteristike materijala

$$S_y = (\sigma)_{\text{kritično}}$$

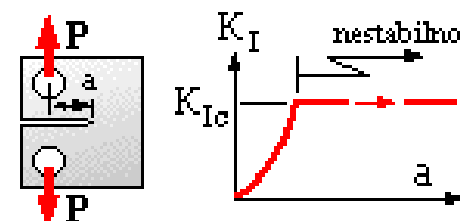


$$\sigma = F/A$$

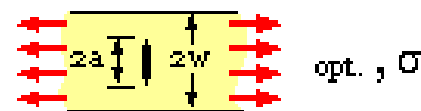
Procjena sigurnosti

$$n = S_y / \sigma$$

PRISTUP PRIMJENOM MEHANIKE LOMA



$$K_{Ic} = (K_I)_{\text{kritično}}$$



$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a Y}$$

$$n = K_{Ic} / K_I$$

Usporedba pristupa određivanja pouzdanosti pomoću mehanike loma u odnosu na tradicionalni pristup pomoću čvrstoće materijala

“Projektirati konstrukciju bez uzimanja u obzir zakazivanje materijala zbog nestabilnosti lokalnih defekata, odnosno pukotina, jednako je opasno kao zanemariti nestabilnost vitke konstrukcije”.

Postoje dva osnovna pristupa analize loma primjenom mehanika loma:

1. ENERGETSKI KRITERIJ

2. PRISTUP ANALIZOM INTENZITETA NAPREZANJA

Oba ta pristupa su ekvivalentna u određenim okolnostima.