

# NERAZORNO ISPITIVANJE BETONA AKUSTIČNOM EMISIJOM

9. PREDAVANJE

1

## AKUSTIČNA EMISIJA

- Akustična emisija (skraćeno: AE) koristi se intenzivnije za ispitivanje betona samostalno ili u kombinaciji s drugim metodama već više od 30 godina
- Prvi radovi su s kraja 50-ih godina 20-og stoljeća
- Iskustva iz rada u laboratoriju pokazuju da je vrlo učinkovita u istraživanju plastičnih deformacija gradiva
- Do danas se nije u široj primjeni koristila za terenska ispitivanja betonskih konstrukcija

2

## AKUSTIČNA EMISIJA

Ispitivanja betona sa akustičnom emisijom provode se iz dva osnovna razloga:

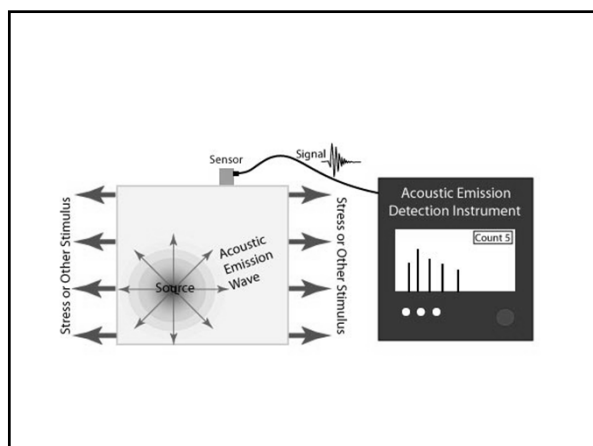
- Da bi se preko AE signala doznalo više o strukturi betona i o tome kakve se strukturalne promjene događaju tijekom opterećivanja. Pri ovoj vrsti ispitivanja akustičnom emisijom betonski uzorci ili elementi se najčešće opterećuju do sloma.
- Da se provjeri da li materijal ili konstrukcija zadovoljavaju prethodno propisane kriterije koji su uglavnom vezani uz probno opterećenje, stupanj oštećenja i slično. U ovom slučaju se opterećivanje materijala ili konstrukcije vrši do određenog nivoa

3

## AKUSTIČNA EMISIJA

- Daje detaljne i trenutne informacije o ponašanju mikrostrukture ispitivanog betona pod određenim naprezanjem
- Specifičnost: signal koji stvara emisiju dolazi iz samog gradiva, a ne iz nekog vanjskog izvora
- Izvori signala akustične emisije na uzorku ili elementu pod naprezanjem su deformacije unutar strukture materijala
- Pojam akustične emisije odnosi se zvukove nečujne ljudskom uhu

4



5

## AKUSTIČNA EMISIJA

- Defekti i ireverzibilne deformacije unutar betona pod opterećenjem uzrokuju oslobađanje veće količine energije i stvaranje elastičnih valova
- Signali AE u betonu i armiranom betonu se u većini slučajeva stvaraju uslijed:
  - procesa raspucavanja
  - gubitka prionljivosti između betona i armature
  - izvlačenja ili pucanja vlakana
  - trenja uslijed zaklinjavanja agregata itd.

6

## AKUSTIČNA EMISIJA

- Elastični valovi se šire kroz beton i prihvaćaju sensorima (akcelerometrima) postavljenim na površini betonskog elementa ili konstrukcije
- Pri opterećivanju i rasterećivanju betonskih uzoraka utvrđeno postojanje Kaiser efekta ispod vrijednosti 70-85 % čvrstoće betona
- **Kaiser efekt:** fenomen nepostojanja akustične emisije sve do trenutka dok nije dosegnuta maksimalna vrijednost naprezanja kojem je materijal prethodno bio izvirgnut

7

## AKUSTIČNA EMISIJA

- Uočeno je da se pojačani signal akustične emisije pojavljuje usporedo sa trenutkom kada vrijednost Poissonovog koeficijenta naglo počinje rasti
- To je posljedica naglog raspucavanja cementne matrice
- Razvojem sofisticirane računalne opreme omogućeno je promatranje mikroraspucavanja betona u vrlo ranoj fazi njegovog opterećivanja
- Tako se pomoću akustične emisije može predvidjeti oštećenje betonskog elementa, a koje je vidljivo tek u kasnijoj fazi

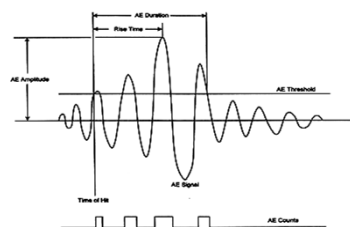
8

## INTERPRETACIJA SIGNALA AE EMISIJE

- Postoji veliki broj načina interpretacije rezultata akustične emisije
- U većini slučajeva način interpretacije rezultata ispitivanja ovisi i o raspoloživoj mjernoj opremi
- Najjednostavniji način procjene rezultata dobivenih akustičnom emisijom jest pomoću AE counta
- AE count predstavlja broj prijelaza signala akustične emisije (eng. AE signal) iznad zadanog praga (eng. AE threshold) osjetljivosti akustične emisije

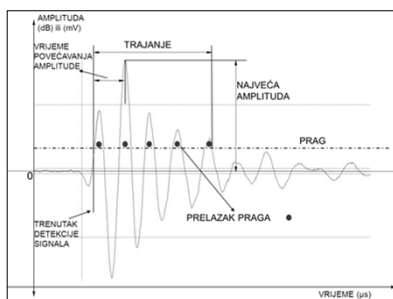
9

## INTERPRETACIJA SIGNALA AE EMISIJE



Tipičan oblik AE signala i najčešće mjereni parametri prilikom ispitivanja akustičnom emisijom

10



11

## INTERPRETACIJA SIGNALA AE EMISIJE

- Interpretacija rezultata akustične emisije pomoću AE counta moguća je preko sljedećih vrijednosti:
  - ukupnog broja dobivenih AE counta tijekom cijelog ispitivanja
  - broja AE counta u promatranoj jedinici vremena (korisno je kada tijekom ispitivanja postoji veliki broj AE counta)
  - srednje vrijednosti AE counta tijekom cijelog ispitivanja, a što se izražava pomoću parametra RMS (eng. root mean square)

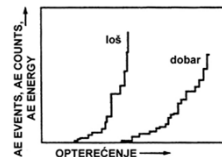
12

## INTERPRETACIJA SIGNALA AE EMISIJE

- Pojedini znanstvenici tvrde da porozan i raspucao materijal emitira veću AE aktivnost od neraspucanog i manje poroznog materijala pod uvjetom da su pod istim opterećenjem
- Ova tvrdnja ne vrijedi za sve vrste betona, a pogotovo ne kada se radi o duktilnim vrstama betona ili morta

13

## INTERPRETACIJA SIGNALA AE EMISIJE



Dijagram opterećenja i kumulativnih parametara akustične emisije prema kojima se razlikuje ponašanje betona

14

## INTERPRETACIJA SIGNALA AE EMISIJE

- Ostali parametri akustične emisije čija analiza može pomoći pri interpretaciji rezultata ispitivanja su slijedeći:
  - **AE event** se odnosi na lokalnu deformaciju unutar strukture materijala koja uzrokuje AE signal. Mjerna jedinica za AE event je decibel
  - **AE hit** predstavlja registriranje pojedinog AE signala na jednom od kanala akustične emisije, a izražava se u decibelima
  - **AE energija** (eng. AE energy) predstavlja mjeru oslobođene energije tijekom ispitivanja akustičnom emisijom u decibelima. Dobiva se sumiranjem površine ispod krivulje amplituda-vrijeme dobivene tijekom ispitivanja

15

## INTERPRETACIJA SIGNALA AE EMISIJE

- **AE amplituda** (eng. AE amplitude) jest maksimalna vrijednost (pozitivna ili negativna) AE signala dobivena tijekom ispitivanja, a mjeri se u decibelima
- **RMS** (eng. root mean square) predstavlja prosječni poboljšani signal akustične emisije, a izražava se u voltima. Može poslužiti kao parametar za ocjenu nastajanja oštećenja
- **ASL** (eng. average signal level) je mjera za prosječnu amplitudu svih AE signala, a izražava se u decibelima

16

## INTERPRETACIJA SIGNALA AE EMISIJE

- **Uzlazno vrijeme** (eng. rise time) jest vrijeme između trenutka kada AE hit prijeđe prag osjetljivosti (eng. AE threshold) pa do trenutka kada je dosegnuta maksimalna amplituda (eng. peak amplitude) istog tog AE hita. Uzlazno vrijeme može pomoći u određivanju mehanizma oštećenja
- **Trajanje AE signala** (eng. Duration) je vrijeme između prvog i zadnjeg prijelaza AE signala prego praga osjetljivosti (eng. AE threshold). Ovaj parametar također može pomoći u određivanju mehanizma oštećenja

17

## INTERPRETACIJA SIGNALA AE EMISIJE

- **Prosječna frekvencija** (eng. average frequency) jest kvocijent između AE countsa i trajanja AE signala (AE duration), a izražava se u kHz
- **AE count do maksimuma** (eng. AE Counts to peak) predstavlja broj AE counta između početka AE hita i trenutka kada isti taj dosegne maksimalnu amplitudu (eng. peak amplitude)
- **Inicijalna frekvencija** (eng. initiation frequency) predstavlja omjer između AE counta do maksimuma (eng. AE counts to peak) i uzlaznog vremena (eng. rise time)

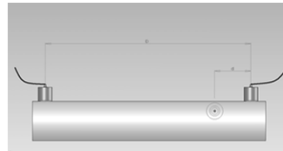
18

## INTERPRETACIJA SIGNALA AE EMISIJE

- **Naknadna frekvencija** (eng. reverberation frequency) predstavlja kvocijent razlika između AE counta i AE counta do maksimuma (eng. AE counts to peak) naspram razlike trajanja AE signala (eng. AE duration) i uzlaznog vremena (eng. rise time)
- Lociranje defekta je tehnika ispitivanja akustičnom emisijom kada se koristi više senzora za primanje AE signala i analizirajući razlike u vremenima kada je pojedini signal došao do kojeg senzora može se pronaći mjesto u betonskom elementu odakle je signal emitiran.

19

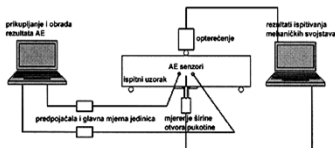
## LOCIRANJE DEFEKTA



20

## MJERNA OPREMA I PROVEDBA ISPITIVANJA

- Mjerna oprema sastoji se od senzora (akcelerometri), predpojačala, glavne mjerne jedinice, računala i programskog paketa za prihvati i analizu dobivenih rezultata ispitivanja



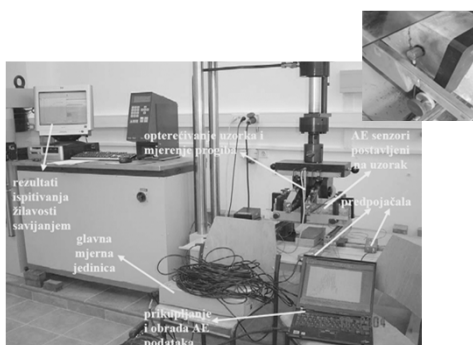
Mjerna oprema za ispitivanje uzorka betona akustičnom emisijom za vrijeme njegovog opterećivanja savijanjem u sredini uzorka

21

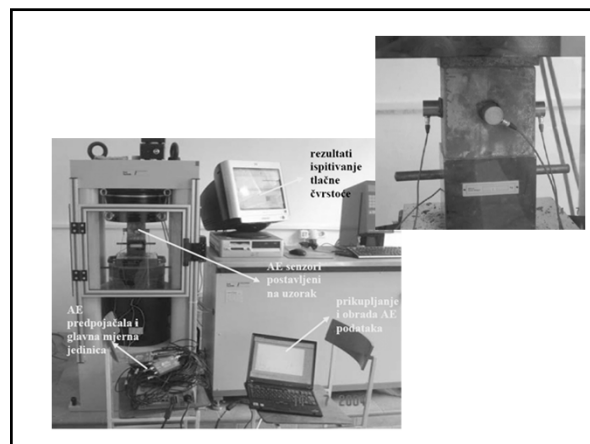
## MJERNA OPREMA I PROVEDBA ISPITIVANJA

- AE signal iz strukture betona se prihvaća pomoću jednog ili više akcelerometara koji se nalaze na površini ispitnog elementa
- Akcelerometri se pomoću prikladnog spojnog sredstva (npr. silikon ili plastelin) spajaju na površinu ispitnog elementa
- Glavni dio akcelerometra je piezoelektrični kristal koji pomakne površine uslijed elastičnog vala pretvara u električni signal

22



23



24

## MJERNA OPREMA I PROVEDBA ISPITIVANJA

- Najveći dio AE ispitivanja provodi se na frekvenciji od 100 do 300 kHz.
- Iz akcelerometra električni signal ide u predpojačalo gdje se pojačava.
- Signal potom ide u glavnu mjernu jedinicu gdje se nalazi i glavno pojačalo, filteri za eliminaciju pojedinih signala itd.
- Na glavnu mjernu jedinicu se spaja računalo sa instaliranim pripadnim programskim paketom

25

## PARAMETRI KOJI UTJEČU NA REZULTATE ISPITIVANJA

### Način opterećivanja

- Brže nanošenje opterećenja utječe na pojavu jačeg AE signala naspram sporijeg nanošenja opterećenja
- Trenje između uzorka betona i čelične ploče preše ili različitih podložnih pločica na uzorku može znatno djelovati na signal dobiven akustičnom emisijom

26

## PARAMETRI KOJI UTJEČU NA REZULTATE ISPITIVANJA

### Dimenzije uzorka

- Neki istraživači tvrde da manji uzorci emitiraju više AE signala. Navode činjenicu da su u manjim uzorcima reducirana i prigušenja valova
- Dio znanstvenika ukazuje na činjenicu da veći uzorci u sebi imaju i veći broj defekata koji su izvori AE signala. Tako je i njihov intenzitet akustične emisije veći
- Može se reći da se elastični valovi generirani uslijed oslobađanja energije zbog deformiranja betona šire kroz betonski uzorak u svim smjerovima, a ne samo prema senzorima koji ih detektiraju
- Na taj način elastični valovi su podvrgnuti refleksiji, difrakciji i drugim procesima unutar betona

27

## PARAMETRI KOJI UTJEČU NA REZULTATE ISPITIVANJA

### Vrsta agregata

- Zasada ne postoje pouzdani podaci o tome da li mineraloško-petrografska svojstva agregata utječu na intenzitet akustične emisije
- Utvrđeno je pri ispitivanju tlačne čvrstoće da se količina AE hitova povećava s rastom maksimalnog zrna agregata. Razlog tome je taj da su defekti unutar strukture više prisutni u betonu sa većim maksimalnim zrnima agregata

28

## PARAMETRI KOJI UTJEČU NA REZULTATE ISPITIVANJA

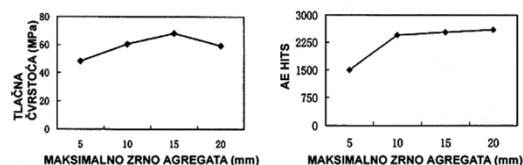
### Vrsta agregata

- Kod morta je radi homogene strukture uočena vrlo mala AE aktivnost
- Ispitivanjem na savijanje uzoraka sa različitim veličinom maksimalnog zrna agregata uočen je porast energije loma i ukupnog broja AE hitova sa povećanjem maksimalnog zrna agregata
- Betoni od lakog agregata emitiraju veću količinu AE counta od betona normalnih čvrstoća, a što je vjerojatno posljedica raspucavanja i dijela agregata pri opterećivanju uzoraka lakog betona

29

## PARAMETRI KOJI UTJEČU NA REZULTATE ISPITIVANJA

### Vrsta agregata



Ovisnost tlačne čvrstoće (lijevo) i količine AE hitova (desno) o maksimalnom zrnima agregata kod običnog betona i betona visokih čvrstoća

30

## PARAMETRI KOJI UTJEČU NA REZULTATE ISPITIVANJA

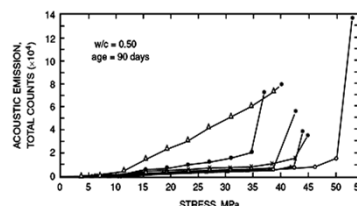
### Čvrstoća betona

- Betoni većih tlačnih čvrstoća emitiraju i veću količinu AE counta prije sloma od betona manjih čvrstoća
- Ukoliko su betoni istih ili sličnih vrijednosti tlačnih čvrstoća, tada će veću količinu AE emisije imati betoni veće starosti
- Pri ispitivanju na savijanje uzoraka betona s različitim matricom (DSP matrica, cementna pasta, dvije vrste morta s različitim maksimalnim zrnom agregata) utvrđeno je da betoni s različitim matricama i pri savijanju imaju bitno drukčija svojstva pri slomu

31

## PARAMETRI KOJI UTJEČU NA REZULTATE ISPITIVANJA

### Čvrstoća betona



Ponovljivost rezultata ispitivanja akustičnom emisijom iste vrste betona tijekom određivanja njegove tlačne čvrstoće

32

## REZULTATI LABORATORIJSKIH ISPITIVANJA SA AE

Postoje dva osnovna cilja koja su zajednička za sva ispitivanja betona sa AE u laboratoriju:

- proširiti postojeća saznanja o procesu oštećivanja betona tijekom njegovog opterećivanja
- prilagoditi akustičnu emisiju građivima s cementnim vezivom kako bi se njihova nosivost i uporabljivost mogli kontrolirati

33

## REZULTATI LABORATORIJSKIH ISPITIVANJA SA AE

- Mnogobrojna istraživanja pokazuju da se akustična emisija može pouzdano koristiti u mehanici loma betona
- Rezultati tih ispitivanja ukazuju na to da su parametri AE u dobroj korelaciji sa procesom širenja pukotina tijekom opterećivanja, kao i sa drugim parametrima mehanike loma kod betona, mortova i cementnih pasti

34

## REZULTATI LABORATORIJSKIH ISPITIVANJA SA AE

- U slučaju tlačnog opterećivanja običnog betona pokazano je da postoji više koraka u procesu raspucavanja:

- najprije nastaju pukotine na sučeljku cementnog kamena i agregata i emitira se velika količina AE eventa
- slijedi područje s manje AE eventa
- u zadnjem koraku dolazi do znatnijeg raspucavanja matrice i opet se emitira veća količina AE eventa

35

## REZULTATI LABORATORIJSKIH ISPITIVANJA SA AE

- Više istraživanja provedeno je sa ciljem da se na temelju ispitivanja akustičnom emisijom odredi tlačna čvrstoća betona
- Većina znanstvenika se slaže u tome da se na temelju količine AE counta pri manjem tlačnom opterećenju može procijeniti njegova tlačna čvrstoća
- Međutim, ova metoda se ne može koristiti u većoj mjeri za procjenu tlačne čvrstoće betona radi velikog rasipanja rezultata.
- Primjer velikog rasipanja rezultata pri prognoziранju tlačne čvrstoće betona na temelju količine AE countsa prikazan je na slici

36

### REZULTATI LABORATORIJSKIH ISPITIVANJA SA AE

- Ispitivanjem akustičnom emisijom na način da se locira mjesto emitiranja AE eventa unutar betonskog uzorka moguće je pouzdano odrediti oštećenje unutar betona prije nego je ono vidljivo na vanjskoj površini
- Ovaj način ispitivanja akustičnom emisijom jest jedan od rijetkih pouzdanih nerazornih metoda za kvantificiranje i lociranje unutarnjih oštećenja unutar betonskog uzorka

37

### REZULTATI LABORATORIJSKIH ISPITIVANJA SA AE

- Akustična emisija omogućuje predviđanje pukotina nastalih uslijed skupljanja betona ili morta. Ni u ovom slučaju ne postoji analitički izraz pomoću kojeg bi se na temelju mjerenja parametara akustične emisije predvidjelo skupljanje betona ili morta
- Proces raspucavanja betona uslijed djelovanja visokih temperatura ili požara moguće je pratiti akustičnom emisijom. Neki istraživači tvrde da je moguće tijekom povećanja temperature utvrditi nastajanje pukotina i njihov razvoj u različitim dijelovima strukture betona.
- Uočeno je i postojanje tzv . temperaturnog Kaiser efekta koji vrijedi do otprilike 600°C. Na taj način može se utvrditi kojoj je temperaturi beton prethodno bio izložen

38

### REZULTATI LABORATORIJSKIH ISPITIVANJA SA AE

- AE omogućuje praćenje i razvoj korozije armature unutar betona
- AE može uspješno koristiti za procjenu prionljivost između armaturne šipke i betona u armiranom betonu i posebno je pogodna kod armirano betonskih elemenata za vrijeme probnog opterećenja, preopterećenja ili u slučaju izloženosti požaru
- Pomoću akustične emisije moguće je ocijeniti kvalitet izvedene sanacije

39

### REZULTATI LABORATORIJSKIH ISPITIVANJA SA AE

- Ispitivanjem akustičnom emisijom moguće je uspoređivati konstruktivne elemente od različitih vrsta gradiva
- Ispitivanja su pokazala i da se pod savojnim opterećenjem različito ponašaju armirane i prednapete betonske grede. Na temelju istih ispitivanja ocijenjeno je da je akustična emisija primjerenija za primjenu kod prednapetih nego armirano betonskih elemenata

40

### TERENSKA ISPITIVANJA SA AE

- Zbog propadanja betonskih konstrukcija uslijed različitih mehanizama degradacije potrebno je ocijeniti njihovo stanje sa ciljem donošenja odluke o djelovanju u svrhu održavanja
- Potreban je i monitoring velikog broja konstrukcija kako bi se na vrijeme reagiralo u procesu njihovog pojačanog održavanja

41

### TERENSKA ISPITIVANJA SA AE

- U većini slučajeva istražni radovi i monitoring se provode pomoću nerazornih metoda ispitivanja
- Obzirom da akustična emisija posjeduje određene prednosti pred drugim nerazornim metodama ispitivanja kao npr. lociranje defekata prije nego je on vidljiv na površini, u posljednje vrijeme intenzivno se istražuje mogućnost korištenja akustične emisije za širu primjenu.

42

## TERENSKA ISPITIVANJA SA AE

- Akustičnu emisiju u terenskim ispitivanjima moguće je koristiti samostalno ili u kombinaciji sa drugim nerazornim metodama ispitivanja
- U kombinaciji sa drugim nerazornim metodama ispitivanja akustična emisija služi za lociranje defekata unutar konstrukcije, a nakon toga druge nerazorne metode detaljnije odrede o kakvom se oštećenju radi

43

## TERENSKA ISPITIVANJA SA AE



Mjesto postavljanja jednog od senzora akustične emisije za monitoring prednapetog nosača mosta

44

## TERENSKA ISPITIVANJA SA AE

- Ukoliko se AE koristi samostalno tada je glavni cilj ispitivanja procjena konstrukcijske cjelovitosti
- U većini slučajeva prije početka terenskih ispitivanja sa akustičnom emisijom na konstrukcijama potrebno je načiniti modelska ispitivanja u laboratoriju
- Pritom se tijekom opterećivanja modela konstruktivnog elementa ili konstrukcije analizira njegovo ponašanje do sloma. Na temelju tako dobivenih zakonitosti procjenjuje se stanje konstrukcija na terenu

45

## TERENSKA ISPITIVANJA SA AE

- U više provedenih istraživačkih radova sa ciljem da se pronađu zakonitosti kod ponašanja konstruktivnih elemenata ističe se da prestanak Kaiserovog efekta i emitiranje AE signala (uglavnom AE energije) prilikom rasterećenja predstavljaju parametre koji ukazuju na ozbiljnije oštećenje konstruktivnih elemenata

46

## TERENSKA ISPITIVANJA SA AE

- Prilikom ispitivanja konstrukcija sa akustičnom emisijom potrebno je načiniti pravilan izbor senzora, njihovog pozicioniranja na konstrukciji, načina njihove montaže, kalibracije, podešavanja parametara akustične emisije i na kraju pravilnu interpretaciju rezultata

47

## TERENSKA ISPITIVANJA SA AE

- AE se zasada najviše koristi za procjenu stupnja oštećenosti i dugotrajni monitoring različiti armiranobetonskih i prednapetih mostova
- U prednapetim konstrukcijama AE predstavlja jedinstvenu metodu ispitivanja jer se pomoću nje može dijagnosticirati puknuće prednapetih kabela uslijed korozije armature

48



## TERENSKA ISPITIVANJA SA AE

- AE se koristi i za ispitivanje objekata visokogradnje, betonskih cijevi, geotehničkih objekata
- U većini od tih primjena koristi se svojstvo akustične emisije da locira mjesto oštećenja prije nego ono bude vidljivo na vanjskoj površini konstrukcije
- Pritom je uočeno pukotine koje su se pojavile unutar konstruktivnog elementa emitiraju znantno veću AE energiju od pukotina koje su već izbile na vanjsku površinu konstruktivnog elementa