

## PRIMJENA STEREOMETRIJSKIH MJERENJA U PROCJENI CJELOVITOSTI KONSTRUKCIJA

### APPLICATION OF STEREOOMETRIC MEASUREMENTS IN STRUCTURAL INTEGRITY ASSESSMENT

Nenad GUBELJAK <sup>1)</sup>, Jožef PREDAN <sup>1)</sup>, Dražan KOZAK <sup>2)</sup>, Tomaž VALH <sup>3)</sup>

**Ključne riječi:** cjelovitost konstrukcija, mehanika loma, stereometrijsko mjerjenje deformacija, CTOD parametar

**Key words:** structural integrity, fracture mechanics, stereometric strain measurements, CTOD parameter

**Sažetak:** U radu je prikazan današnji stupanj primjene postupaka za procjenu cjelovitost i životnog vijeka konstrukcija i dani su primjeri otkaza. Daljnji razvoj istraživanja je usmjeren na neprekidno praćenje deformacija i oštećenja, kako bi se što bolje iskoristile mogućnosti koje nudi računalna tehnika. Prikazana je stereometrijska metoda praćenja deformacija i dan je primjer njene primjene, kao i mogući sustav za neprekidno praćenje integriteta konstrukcija uvođenjem novih tehnika.

**Abstract:** The paper presents the application extent of procedures for structural integrity and life-time of structural components with examples of failure. Further development of research is focused on continuous strain and damage monitoring in order to take full advantages of computer technology. The stereometric method for strain monitoring is presented with an example of application, and possible system for constant monitoring structural integrity with new techniques implemented.

<sup>1)</sup> Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo Smetanova ulica 17, 2000 Maribor, Slovenija

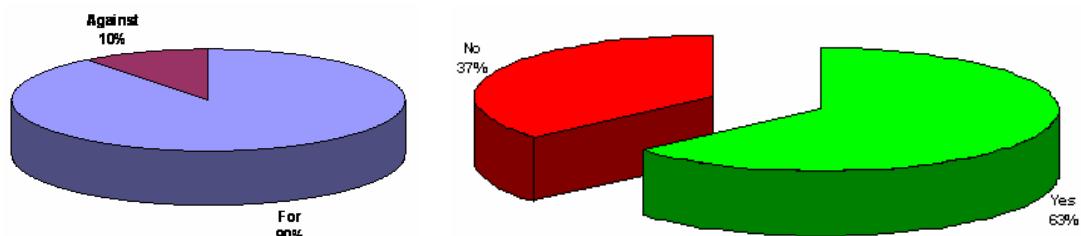
<sup>2)</sup> Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu Sveučilišta u Osijeku, Trg Ivane Brlić-Mažuranić 2, 35000 Slavonski Brod, Hrvatska

<sup>3)</sup> Walch d.o.o. Heroja Zalaznika 8, 2000 Maribor, Slovenija

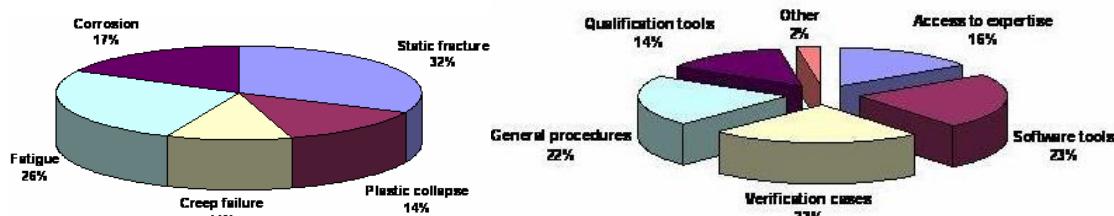
## 1. UVOD

Mehanika loma je teorijskim rješenjem problema pukotina omogućila razvoj pristupa za procjenu cjelovitosti konstrukcija. Napori, uloženi u proširenje primjene mehanike loma, su objedinjeni u Postupku za ocjenu cjelovitosti konstrukcija (SINTAP) [1]. Brojni su primjeri gdje se ocjena integriteta uspješno koristi, ali još uvjek postoje mogućnosti usavršavanja postupaka radi postizanja veće efikasnosti i daljnog snižavanja troškova projektiranja, izrade i eksploatacije konstrukcija.

Ocjena integriteta konstrukcije je od posebnog značaja u eksploataciji, kada treba donijeti odluku je li daljnje korištenje oštećene opreme moguće, i ako jest, pod kojim uvjetima. Odluka o dalnjem korištenju se donosi na osnovi procjene stanja, a prihvaćen termin je "podobnost za upotrebu" (engl. *Fitness-For\_Purpose*). Tako je mišljenje 90 % anketiranih stručnjaka da podobnost treba ocjenjivati, a 63% njih smatra da je potrebno donijeti europske propise kako bi njihovo korištenje bilo jednoznačno, kao što je prikazano na slici 1 [2]. Na slici 2. su prikazani načini otkaza po stupnju zastupljenosti u industriji i udjeli pojedinih namjena procjene podobnosti za upotrebu [3]. U procjeni podobnosti za upotrebu dva su utjecaja najznačajnija. Prvi je izbor prikladnog postupka za ocjenu značaja grešaka i integriteta oštećene konstrukcije. Drugi utjecaj je utvrđivanje tipa greške, njene veličine i položaja u konstrukciji. Točnost procjene podobnosti ovisi od točnosti podataka o grešci. Zbog toga se metode za otkrivanje greške i njenu karakterizaciju intenzivno razvijaju, s idejom da se jednom otkrivena greška što učinkovitije prati u eksploataciji.



Slika 1. Ocjena stručnjaka o razvoju tehnologije podobnosti za upotrebu konstrukcija (FFS)



Slika 2. Najčešći načini otkaza konstrukcija (lijevo) i područja u kojima je podobnost za upotrebu potrebna (desno)

## 2. PRIMJERI OTKAZA I PRIKAZ PRATEĆIH ISTRAŽIVANJA

Od ukupnog broja otkaza na statički lom otpada 32 %, na zamor 26 %, koroziju 17 %, plastično popuštanje 14 % i puzanje 11 % (slika 2). Karakterističan primjer zamora zavarenog spoja je prikazan na slici 3. Neka su oštećenja komponenti vidljiva i lakša za otkrivanje, a neka vrlo teško. Tako npr. koroziju vanjske površine cijevi je lako otkriti (slika 4), međutim, koroziju ispod izolacije (slika 5) je teško otkriti, a ona predstavlja opasno lokalno oštećenje konstrukcije

velikih dimenzija, u ovom slučaju kolone. Na slici 6. su označena mjeseta utvrđene korozije ispod izolacije.

U sva tri navedena primjera moguće je pratiti razvoj oštećenja u eksploataciji. U slučaju cijevi dovoljno je vizualno praćenje razvoja oštećenja (slika 4). Međutim, zamorna pukotina (slika 3) je otkrivena tek kad dostigne dovoljnju dužinu i kad postane otvaranje pukotine postane vidljivo golim okom. Očigledno je da je razvoj pukotine proces u određenom vremenskom intervalu, što upućuje na mogućnost pravovremenog otkrivanja i praćenja tijekom eksploatacije, uz neprekidnu procjenu podobnosti za upotrebu. Vrlo je teško otkriti koroziju ispod izolacije na rafinerijskom postrojenju (slika 6), a neprekidni nadzor napredovanja otkrivene korozije prepostavlja razvoj odgovarajućeg sustava za praćenje.

Prisilna obustava rada opreme (slike 3 – 6) može imati posljedice po okoliš i uzrokovati znatan materijalni gubitak, pa je takve prekide rada i sanacije potrebno izvesti uz potrebne pripreme i planski. Procjena podobnosti za upotrebu u tom slučaju treba omogućiti ispravnu odluku do kog je vremenskog perioda moguće daljnje sigurno koristiti postrojenje. Stoga je nužno u tom smislu osigurati neprekidno praćenje napredovanja utvrđenog oštećenja.



Slika 3. Zamorna pukotina na zavarenom spoju rebra za ukrućenje  
 (lijevo - pogled odozgo, desno - pogled sa strane) [3]



Slika 4. Korozija vanjske površine cijevi



Slika 5. Korozija ispod izolacije [3]

Sa slike 7 [2] se može sagledati složenost istraživanja u području cjelovitosti konstrukcija, odnosno koji su sve podaci potrebni za procjenu podobnosti za upotrebu. Tu je ujedno pokazan i smjer istraživanja i razvoja, uskladen s iskustveno utvrđenim potrebama prilikom praktične primjene postupaka za ocjenu integriteta i procjenu podobnosti za upotrebu. Prvo treba raspolagati dovoljno pouzdanim podacima o materijalu, što podrazumijeva i odgovarajuće uzorkovanje. Također je potreban podatak o zaostalim naprezanjima, što ima poseban značaj za

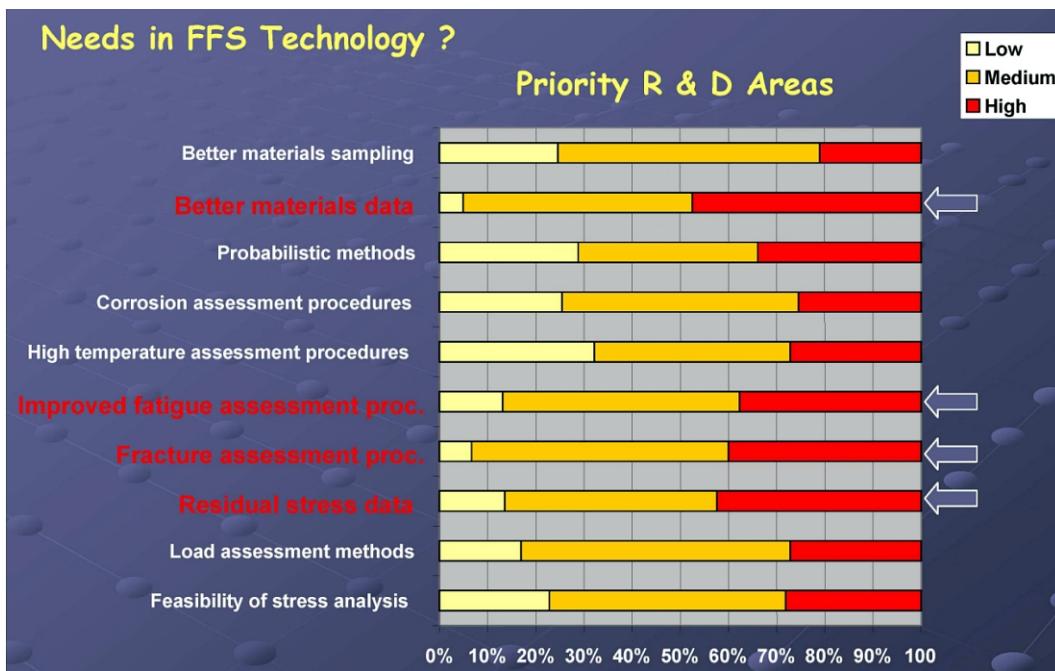
zavarene konstrukcije. Analiza naprezanja i deformacija podrazumijeva poznavanje opterećenja i precizno definiran njegov karakter i uvjete djelovanja, uzimajući u obzir i utjecaj radne sredine. Imajući u vidu karakter problema koji se proučava, razvoj metoda vjerojatnosti, njihovo dobro poznavanje i uvjeti primjene su isto tako značajni za uspješnu procjenu podobnosti za upotrebu. Svi ovi podaci su preduvjet za korištenje razvijenih postupaka za utvrđivanje značaja oštećenja. To se odnosi na postupke za ocjenu oštećenja korozijom, na zamor materijala, pojavu i razvoj loma, i na utjecaj visokih temperatura i puzanje materijala. Dobar dio tih procedura je uključen u dokument SINTAP [1], razrađen do razine praktične primjene. Svemu ovome treba dodati zahtjev za podacima o greškama, koji treba biti što precizniji, s opisom karaktera, veličine i položaja greške.



Slika 6. Označena mjesta oštećenja korozijom ispod izolacije na kolonama

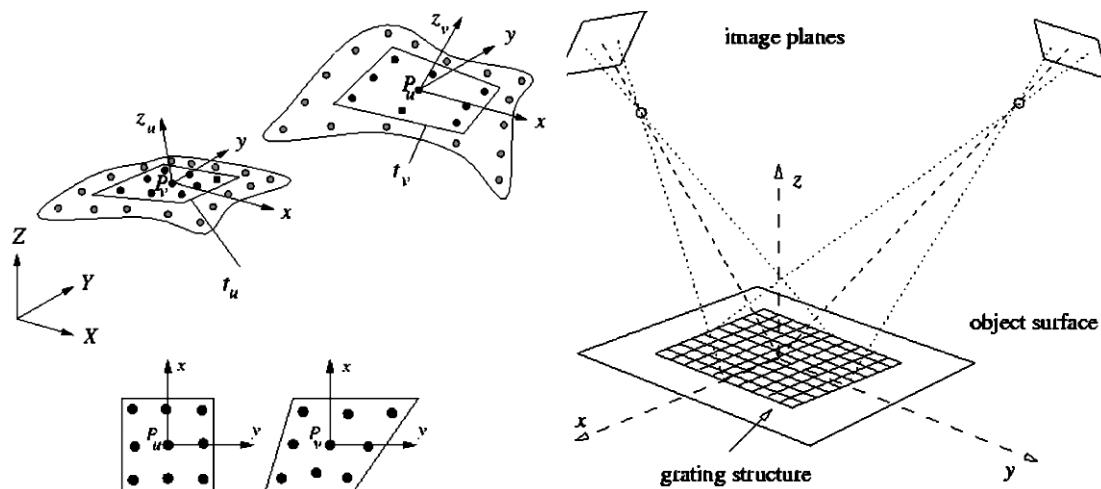
### 3. PRINCIP STEREOMETRIJSKIH MJERENJA

Potpuna slika o deformacijama elemenata konstrukcije se može dobiti praćenjem promjene prostornih komponenti deformacije, odnosno određivanjem veličine tri međusobno okomite komponente deformacije ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ , slika 8). Koordinate izabranih točaka mreže se mijenjaju zbog pomicanja tih točaka, uzrokovanih povećanjem opterećenja i naprezanja, odnosno deformacija. Na promatranom segmentu elementa se nanosi mreža (raster) u koordinatnom sustavu, a karakteristične presječne točke linija mreže se izabiru za praćenje pomaka strukture. Na slici 8. je prikazan segment elementa konstrukcije sa točkama mreže u početnom i u deformiranom stanju, i posebno je izdvojen detalj u kojem se pomaci točaka prate u prostoru mjerenjem njihovih trenutnih koordinata [4]. Praćenje koordinata točaka omogućava uporaba odgovarajućih matematičkih formula, počevši od veza komponenti deformacija do formula koje se koriste za ocjenu integriteta konstrukcija.



Slika 7. Područja istraživanja integriteta konstrukcija i udio značaja pojedinih aspekata [2]

Drugi dio problema se sastoji u načinu mjerjenja pomaka. Snimanje video kamerom se uzima kao vrlo prikladna metoda (slika 9). Kako bi se odredili pomaci, potrebno je na video snimci neprekidno pratiti odbijanje zrake upućene iz lasera na površinu na koju je nanijeta mrežica s vidno označenim presječnim točkama, čija se pomicanja prati. Na ovaj način se dobiveni podaci mogu upamtiti u memoriji računala ili se neposredno upotrijebiti u računalu s instaliranim prikladnim softverom.



Slika 8. Prikaz točaka koordinatne mreže u početnom i u deformiranom stanju konstrukcijskog elementa

Slika 9. Sustav za neprekidno praćenje pomaka točaka mreže videokamerom pomoću odbijenih laserskih zraka [4]

Stereometrijsko mjerjenje pomaka je od posebnog interesa kod materijala heterogene strukture i na mjestu koncentracije naprezanja i deformacija. U tom slučaju se po prekoračenju

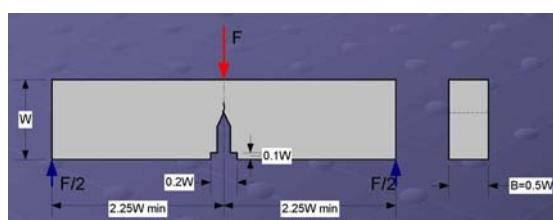
granice elastičnosti i prelasku u zonu plastičnih deformacija lokalno javljaju velike vrijednosti pomaka, koje nije moguće odrediti na drugi način. S druge strane, podaci dobiveni tim mjerjenjem su osnova za proračun veličina parametara mehanike loma, npr. otvaranja pukotine i  $J$ -integrala, potrebnih za ocjenu integriteta.

#### 4. STEREOMETRIJSKO MJERENJE U ISPITIVANJU

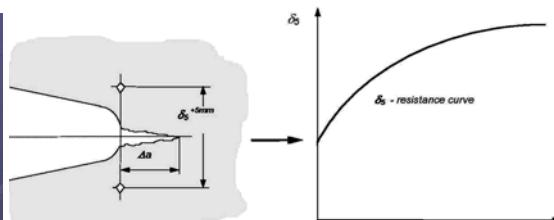
U ovom radu je prikazano stereometrijsko mjerjenje na epruvetama s pukotinom, primijenjeno radi dobivanja detaljnije slike raspodjele deformacija oko vrška pukotine. Kako bi se tim mjerjenjem ocijenili dobiveni rezultati, veličine parametara mehanike loma treba usporediti s rezultatima dobivenim uobičajenim postupkom, standardnim ispitivanjem lomno-mehaničkih epruveta s pukotinom.

Standardna epruveta s pukotinom je prikazana na slici 10, detalj mjerjenja otvaranja pukotine metodom  $\delta_5$  [5] je prikazan na slici 11, zajedno sa rezultatom ispitivanja u obliku  $J$ -R krivulje.

Standardno ispitivanje otvaranja pukotine je definirano za homogen materijal, i samo pod nekim uvjetima se može primijeniti za ispitivanje heterogenog materijala (BS 7488 Part 2-1998), ovisno o tome kakav je metal šava zavarenog spoja (slika 12, slika 13). U ovom ispitivanju je zavareni spoj izведен jednim dijelom s metalom šava više čvrstoće, a jednim dijelom s metalom šava niže čvrstoće u odnosu na osnovni metal. Ispitivan je spoj izведен od čelika tipa HT 50 za posude pod tlakom, zavaren punjenom žicom (FCAW postupak). Osnovni podaci o mehaničkim svojstvima i energiji udara po Charpyju dani su u tablici 1. Iz podataka o granici tečenja metala zavara i osnovnog metala može se odrediti faktor nejednakosti čvrstoće  $M$  (engl. *yield strength mis-match factor*). On je definiran kao omjer metala zavara više čvrstoće i osnovnog metala  $Mo = 648/545 = 1,19$  (OM), odnosno kao omjer metala zavara niže čvrstoće i osnovnog metala  $Mu = 469/545 = 0,86$  (UM), kao u [6].



Slika 10. 3PB epruveta za određivanje parametara mehanike loma

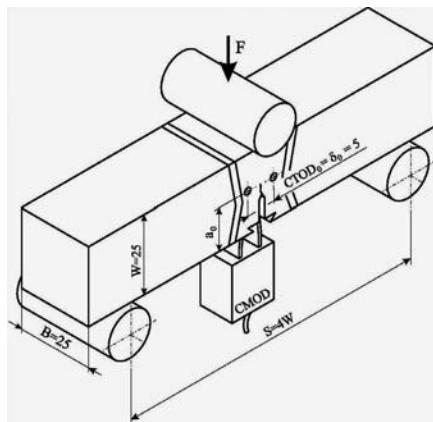


Slika 11. Mjerenje otvaranja pukotine i J-R krivulja

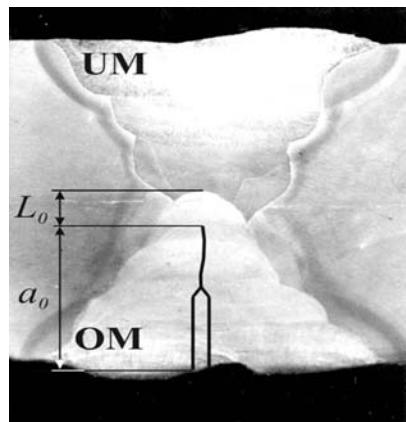
Značajna razlika u veličini naprezanja tečenja i plastične deformacije ispred vrška pukotine se može očekivati u pravcu rasta pukotine (slika 13. i tablica 1), što utječe na ponašanje pri lomu i na veličinu odabranog parametra mehanike loma za analizu.

Tablica 1. Mehanička svojstva osnovnog materijala i metala zavara više i niže čvrstoće

Parametar	Granica tečenja	Zatezna čvrstoća	Energija udara na - 60 °C
Parametar	$R_{p0.2}$ , MPa	$R_m$ , MPa	$C_v$ , J
Metal zavara više čvrstoće	648	744	>40
Osnovni materijal	545	648	>60
Metal zavara niže čvrstoće	469	590	>80



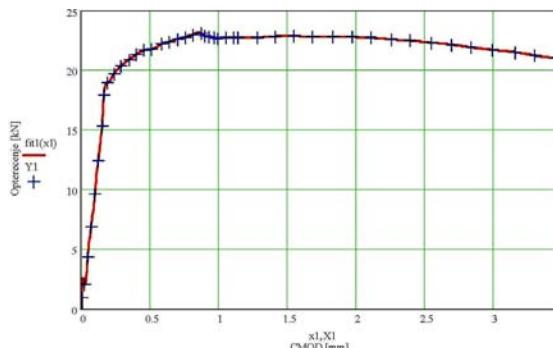
Slika 12. Epruveta iz zavarenog spoja pripremljena za savijanje u tri točke



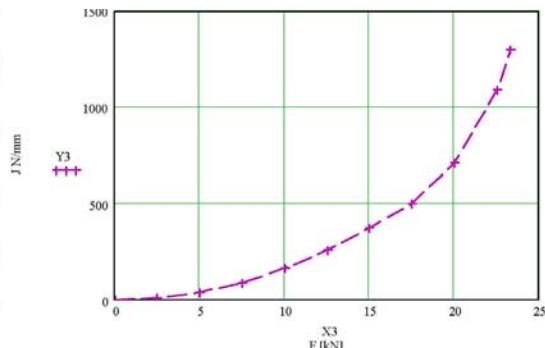
Slika 13. Detalj pukotine u metalu zavara epruvete iz zavarenog spoja [6]

Rezultati ispitivanja u ovom eksperimentu su prikazani dijagramski, u obliku direktno dobivene ovisnosti opterećenja i otvaranja pukotine (slika 14), i  $J$ -integrala i opterećenja (slika 15), pri čemu je  $J$ -integral, neovisan o putanji integracije, određen prema klasičnoj formuli [7].

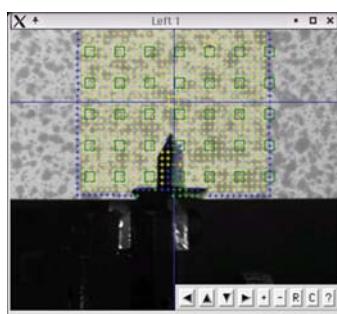
U istom eksperimentu je primijenjena stereometrijska metoda ispitivanja. Opterećenje je tijekom eksperimenta praćeno na 50 različitih nivoa. Na slici 16. je prikazana epruveta s nanim rasterom pri niskoj razini opterećenja, srednjem velikom opterećenju i pri visokoj razini opterećenja epruvete.



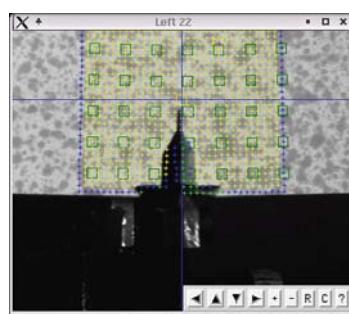
Slika 14. Ovisnost opterećenja i pomaka otvaranja usta pukotine (CMOD)



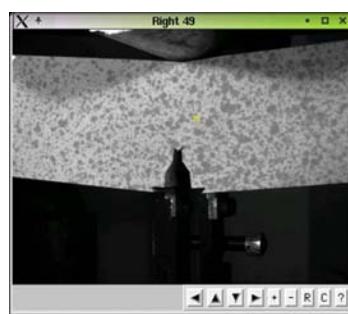
Slika 15. Ovisnost  $J$  integrala o opterećenju epruvete



Niska razina opterećenja, neznatno i nevidljivo otvaranje pukotine



Srednje veliko opterećenje, vidljivo otvaranje pukotine



Visoka razina opterećenja, plastična deformacija i rast pukotine

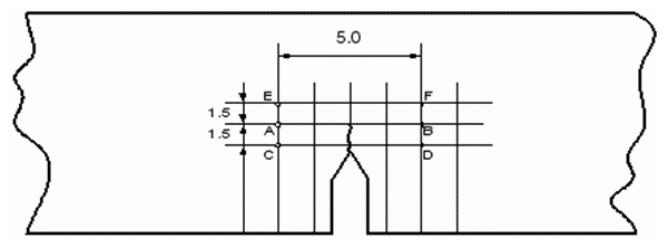
Slika 16. Izgled epruvete s pukotinom tijekom ispitivanja stereometrijskom metodom pri različitim intenzitetima opterećenja

Opterećenje je tijekom eksperimenta praćeno na 50 razina. Na slici 16. lijevo se vidi da niska razina opterećenja (nivo 1) ne dovodi do otvaranja pukotine, pri srednjem nivou (22) otvaranje postaje vidljivo, a pri visokoj razini opterećenja epruvete (49) je plastična deformacija izražena i praćena rastom pukotine.

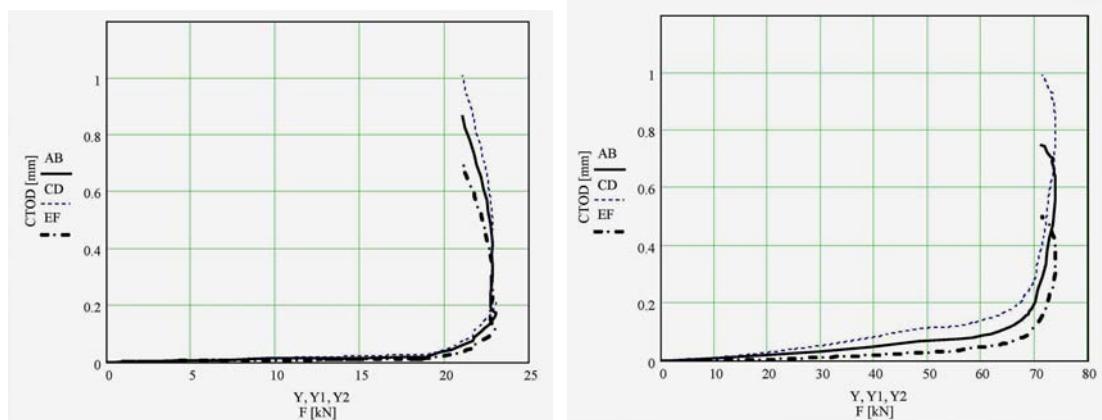
Deformacije u okolini vrška pukotine su praćene u točkama A do F (slika 17. gore). Dobiveni rezultati su prikazani u dijagramu ovisnosti pomak otvora vrška pukotine (CTOD) – opterećenje za dva karakteristična slučaja (slika 17. dole): pukotina propagira iz metala zavara niže čvrstoće u metal zavara više čvrstoće (lijevo), i iz metala zavara više čvrstoće u metal zavara niže čvrstoće (desno).

Zbog heterogene mikrostrukture pukotina napreduje kroz područja različitih granica tečenja, odnosno različite žilavosti loma, koja ovise o naprezanju tečenja. Sukladno tome, i veličina deformacije u neposrednoj okolini vrška pukotine će se neprekidno mijenjati s propagacijom pukotine, što je stereometrijskim mjerjenjem moguće pratiti, ali ne i klasičnim ispitivanjem mehanike loma.

Može se zaključiti kako stereometrijsko ispitivanje daje puno više podataka za analizu razvoja deformacija i pukotine od standardnog ispitivanja mehanike loma, te omogućava neprekidno praćenje uz sakupljanje podataka i kao takvo predstavlja metodu primjenljivu za praćenje konstrukcija u eksploataciji. Ilustracije radi, na slici 18. je dan dijagram raspodjele deformacija pri srednjem nivou opterećenja, koji odgovara slici 16. u sredini.



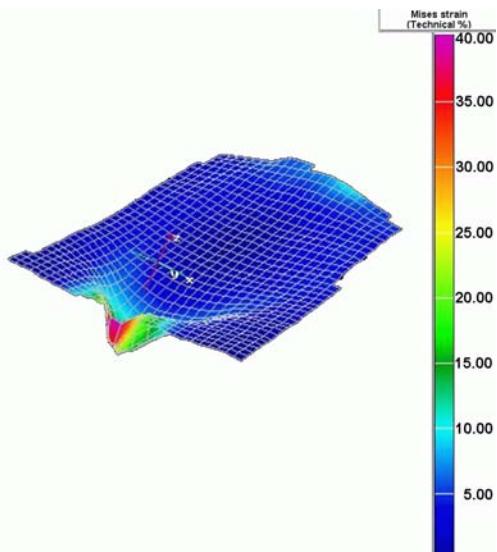
Karakteristične točke rastera pri stereometrijskom ispitivanju za određivanje otvaranja pukotine



Slika 17. Ovisnost otvaranja pukotine od opterećenja praćena u tri ravnine oko vrška pukotine (AB; CD i EF)

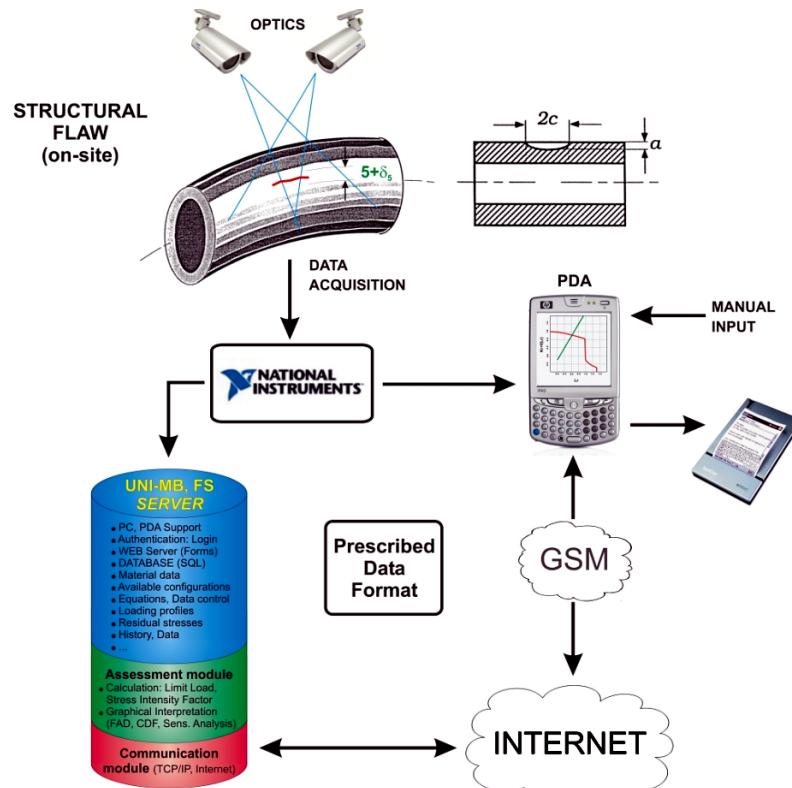
## 5. STEREOMETRIJSKO MJERENJE U ISPITIVANJU

Iskustvo sa neprekidnim praćenjem deformacija, stečeno u izvedenom eksperimentu, upućuje na mogućnost sličnog pristupa u praćenju konstrukcija u eksploataciji. Problem je u načelu mnogo složeniji i zahtjeva uspostavljanje sustava, kao što je sustav prikazan na slici 19 [8].



Slika 18. Raspodjela deformacija oko vrška pukotine dobivena stereometrijskim mjerjenjem

Sustav se u osnovi sastoji iz tri dijela: akvizicija podataka preko prikladnog optičkog sustava, kao što je stereometrijsko mjerjenje, obrada i korištenje podataka uz pomoć odgovarajućih formula preko servera prikladne konfiguracije i kapaciteta, i vanjski dio, koji obuhvaća ručni unos podataka i GSM Internet vezu. Komponente sustava su opisane na slici 19. Treba uočiti da je u sustav unijet i uređaj za mjerjenje otvaranja vrška pukotine ( $\delta_5$ ), neophodan za određivanje parametara mehanike loma.



Slika 19. Sustav za neprekidno praćenje deformacija i oštećenja na konstrukciji, akviziciju podataka i procjenu podobnosti za upotrebu

## 6. ZAKLJUČCI

U radu je prikazano da provedena anketa Europske komisije među stručnjacima ukazuje na potrebu za povećanjem stupnja sigurnosti rada konstrukcijskih komponenti u cilju sprječavanja lomova, uzrokovanih prisutnošću pukotina (kao posljedica greške u materijalu, zamora, korozije ili puzanja). Danas stupanj tehnološkog razvoja omogućava kombiniranje znanja i iskustava iz područja mehanike loma, stereometrijskih mjerjenja, integriranih računalnih programa za praćenje i obradu podataka, te bežičnog telekomunikacijskog sustava, što doprinosi bitnom povećanju sigurnosti rada u eksploataciji konstrukcija na različitim lokacijama i s različitim namjenama.

## 7. LITERATURA

- [1] SINTAP Procedure: Brite European project, Final version: November 1999.
- [2] JRC-FITNET Survey: Joint Research Centre of European Commission, Petten, 2004.
- [3] FITNET: Fitness-for-Purpose procedure: EU project of the 5th frame-work programme: Final document, Amsterdam, May 2006.
- [4] ARAMIS GOM
- [5] GKSS: Displacement Gauge System for Application in Fracture Mechanics, Patent Publication, Geesthacht, 1992.
- [6] Gubeljak, N., Semenski, D., Drvar, N., Predan, J., Kozak, D., Oblak, M., Object grating method application in strain determination on CTOD tests, *Strain*, May 2006, Vol. 42, Iss. 2, 81-87.
- [7] Rice, J.R., Tracey, D.M., On the Ductile Enlargement of Voids in Triaxial Stress Fields, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 17, 1969, 201-217.
- [8] MOSTIS-EUREKA! Project, 2006.