

**ODREĐIVANJE DEFORMACIJA I NAPONA ISPITIVANJEM
INDIREKTNIM METODAMA I MODELIRANJEM**
**DETERMINATION OF STRAINS AND STRESSES BY TESTING OF
INDIRECT METHODS AND MODELLING**

U cilju daljeg unapređenja sistema praćenja integriteta i produženja veka konstrukcija u JKP „Beogradske elektrane“ je 17. marta 2006. održan seminar pod gornjim naslovom u organizaciji Društva za integritet i vek konstrukcija (DIVK). Koordinatori seminara su bili Stojan Sedmak, predsednik DIVK, i saradnici Centra za ispitivanje, kvalitet i ekologiju JKP „Beogradske elektrane“ Vasilije Sarić, direktor i Branislav Brajović.

Predavanja na seminaru su usmerena na nove metode ispitivanja materijala i opreme koji se mogu koristiti u postupku procene podobnosti za upotrebu, a upotpunjena su predavanjima o savremenim numeričkim metodama za proračun stanja napona i deformacija na osnovu izvedenih ispitivanja i otkrivenih grešaka u materijalu. Da bi se postigli što bolji efekti pri uvođenju novih postupaka ispitivanja potrebno je sagledati aktuelno stanje u pogledu njihovog razvoja i praktične primene. Kako su održana predavanja od opšteg interesa za analizu integriteta konstrukcija, procenu podobnosti za upotrebu i određivanje preostalog veka, uredništvo časopisa *Integritet i vek konstrukcija* je zamolilo autore izloženih predavanja da ih pripreme za objavljivanje u časopisu. Obim predavanja na seminaru bio je veliki, pa su za ovaj dvobroj časopisa pripremljena predavanja koja se odnose na postupke ispitivanja. Radi potpunosti, predavanja su dopunjena radom koji se odnosi na mogućnost uvođenja sistema kontinualnog praćenja i odlučivanja na osnovu podataka dobijenih ispitivanjem i kompjuterskih programa, koji je pripremljen od strane saradnika firme UNO-LUX NS, Beograd, a koja je pridruženi partner firme *National Instruments* i predstavnik ove firme za Srbiju i Crnu Goru.

Osnovna orijentacija firme *National Instruments* je projektovanje i realizacija nadzorno-upravljačkih i merno-akvizicijskih sistema za automatizaciju različitih vrsta ispitivanja, procesa, mašina i proizvodnih linija. Jedan od takvih programskih paketa je LabVIEW, uveden i u našim laboratorijama. Firma UNO-LUX NS održava kurseve za obuku korisnika programa LabVIEW za račun firme *National Instruments*.

Na taj način će čitaoci našeg časopisa dobiti potpuniju sliku o efikasnijem praćenju opreme u eksploataciji iz aspekta integriteta konstrukcija.

Očuvanje raspoloživosti konstrukcije u toku eksploatacije je jedan od osnovnih zadataka u održavanju i preventivi. Nova konstrukcija se smatra sigurnom ako je izvedena prema projektnoj dokumentaciji. Dopuštaju se izvesna odstupanja od projekta i greške u konstrukciji, koja se uvodi u eksploataciju ili se već koristi, pod uslovom da po obliku i veličini ne prelaze propise standarda.

In the scope of future improvements of monitoring systems for structural integrity and life extension a seminar under above given title had been organised by the Society for Structural Integrity and Life (DIVK) at JKP “Beogradske elektrane” on March 17, 2006. Seminar was organised by Stojan Sedmak, DIVK president, and co-workers of JKP “Beogradske elektrane” Centre for testing, quality and ecology, Vasilije Sarić, manager, and Branislav Brajović.

Seminar lectures referred to new methods for testing materials and equipment applicable in the fitness-for-service procedure, and were complemented with lectures on modern numerical methods for calculation of stress and strain state, supported by performed tests and detected defects within the material. In order to achieve better effects in implementing new testing procedures it is necessary to get an insight in the actual situation regarding their development and practical application. Because the presented lectures are of general interest for structural integrity analysis, assessment of fitness-for-service and evaluation of residual life, the editors of the journal *Structural Integrity and Life* had asked the authors of the held lectures to prepare papers for publication in the journal. The scope of seminar lectures was wide, hence in this double issue the lectures considering test methods are prepared. For completeness of lectures, a paper has been added devoted to the possibility of implementation of continuous monitoring and decision system based on data obtained by testing and computer software, prepared by co-workers from the company UNO-LUX NS, Beograd, an alliance partner and representative of *National Instruments* for Serbia and Montenegro.

Basic orientation of *National Instruments* is design and performance of monitoring-control and measurements-acquisition systems for automatization of various kinds of tests, processes, machines and production lines. One such programme package is LabVIEW that is implemented also in our laboratories. The company UNO-LUX NS holds courses for the education of LabVIEW programme users on the behalf of *National Instruments*.

In this way the readers of our journal will have a more complete picture about highly efficient equipment monitoring during service from a structural integrity point of view.

One of the basic tasks in maintenance and prevention is to preserve equipment availability in-service. The new structure is considered safe if it is manufactured in accordance to the design documentation. Exceptions in design and defects in manufacture may be allowed in the component introduced into service or already in use under the condition that their shape and size do not go beyond standard requirements.

Ovaj je pristup detaljno razrađen za zavarene konstrukcije. Za sigurnost zavarene konstrukcije prsline imaju poseban značaj zbog koncentracije napona na njihovom vrhu i zbog heterogenosti mikrostrukture. Kada se nađu u polju visokih napona, prsline u komponenti mogu da dovedu do loma. Zbog toga osnovni pristup obezbeđenja kvaliteta i sigurnosti zavarene konstrukcije ne dopušta prsline, kako pri izradi, tako i u toku eksploatacije, što uslovljava sanaciju konstrukcije radi otklanjanja otkrivene prsline ili druge greške. Sanacija konstrukcije znači njeno dovođenje u stanje podobno za upotrebu, ali tako da ona više ne mora da u svemu odgovara projektom postavljenim zahtevima. Posebnom analizom se utvrđuje u kojoj meri sanirana konstrukcija odstupa od prvobitnog projekta, s jedne strane, i ocenjuje da li može da zadovolji uslove dalje eksploatacije, sa druge strane. U nekim slučajevima sanacija nije najpovoljnije rešenje, naročito kada je udeo prsline u poprečnom preseku mali i kada se ona nalazi u polju napona niskog nivoa, pa nema opasnosti od daljeg rasta prsline.

Pri oceni sigurnosti komponente sa greškom neophodno je raspolagati sa tri grupe podataka. Prvo je potrebno utvrditi postojanje greške, odrediti njenu veličinu i položaj. Druga grupa podataka se odnosi na otpornost materijala i zavarenog spoja prema prslinama, što se iskazuje parametrom prsline. Ovde spada i istorija opterećenja, zbog degradacije svojstava materijala tokom rada. Treća grupa obuhvata podatke o radnim uslovima, radnoj sredini, mehaničkom opterećenju i uspostavljenom polju napona.

S ciljem da se greške blagovremeno otkriju i, po potrebi otklone sanacijom, za redovno održavanje u toku eksploatacije se propisuju odgovarajući obim kontrole i ispitivanja, najvećim delom ispitivanja bez razaranja (NDT). Koja će od metoda NDT biti primenjena u datoj situaciji zavisi od zahteva sigurnosti konstrukcije i cene ispitivanja. Naime, što je zahtev u pogledu sigurnosti konstrukcije strožiji to će ispitivanje biti detaljnije, često primenom više NDT metoda, što neizbežno dovodi do veće cene ispitivanja i održavanja. Odluka o primeni NDT metode zavisi od prikladnosti i osetljivosti metode i opreme za njeno izvođenje i od veličine i položaja greške. Time se zahtev da u zavarenim spojevima nema prsline svodi na one prsline koje se primenom NDT metodom mogu otkriti. Prsline manje veličine od praga osetljivosti NDT metode se prihvataju, jer nije ni utvrđeno da postoje. To znači da u konstrukciji mogu postojati prsline i druge greške veličine manje od praga osetljivosti metode, koje u uslovima eksploatacije mogu da rastu različitim mehanizmima (preopterećenje, zamor, korozija, naponska korozija, puzanje). Ni položaj prsline se ne može tačno odrediti, jer na to utiču ne samo prikladnost i preciznost NDT opreme, već i veština operatora. Kao pogodne u sistemu kontinualnog praćenja konstrukcija, ovde su obrađene beskontaktno metode (holografija, termovizija, snimanje televizijskom kamerom) i senzorske metode (ultrazvuk i njegova C-skan varijanta, akustična emisija). Iako se u mnogim slučajevima koriste, merne trake i sistemi za obradu rezultata njihovih ispitivanja ovde nisu obrađeni, jer za njih već postoji obimna literatura. Radi potpunijeg praćenja u narednoj tabeli su date osnovne karakteristike obrađenih metoda.

This approach is developed in detail for welded structures. The crack is of special importance for the safety of welded structures due to stress concentration at crack tip and microstructural heterogeneity. When located in the field of high stress, the crack in a component may cause fracture. So, the basic principle for quality assurance and safety of the welded structure does not allow for cracks, neither in manufacture nor in service, thus requiring repair of the structure so to eliminate the detected crack or other defect. Structural repair means to restore it to the state fit for service in a way that it is not required to completely meet specifications posed by design. A particular analysis should determine how much the repaired structure differs from initial design on one hand, and should assess whether it can meet conditions of continued service, on the other. In some cases, repairing is not a most convenient solution, especially when the cracked portion in the cross-section is small and the crack is located in the field of low level stress, without the danger of extended crack growth.

The safety assessment of a defective component requires three groups of data. First of all, defect detection is required, and determining its size and location. The second group of data refers to the crack resistance of the material and welded joint which is expressed by a crack parameter. This group also includes loading history, because of degraded material properties in operation. The third group comprises of data about working conditions, environment, mechanical loading, and the stress field.

In order to detect defects beforehand, and if necessary, to repair them, appropriate inspection and tests are anticipated to some extent for regular maintenance in service, and mostly non-destructive-test (NDT) methods. Which of the NDT methods will be applied in the given situation depends on requirements regarding structural safety and inspection cost. In fact, the more strict the requirements regarding structural safety are, a more detailed inspection will be required, often applying several NDT methods and will lead to higher inspection- and maintenance costs. The selection of the applied NDT method depends on its suitability and equipment sensitivity, and on the defect size and location. Hence, the requirement for a welded joint with no cracks is reduced to cracks detectable by NDT method. Cracks of sizes smaller than the sensitivity threshold of the method are accepted, since they are not detected. This means that a structure can have cracks and other defects of sizes less than the sensitivity threshold of the applied method, and they continue to grow in service under different mechanisms (overloading, fatigue, corrosion, stress corrosion, creep). Also crack location cannot be determined accurately, due not only from NDT equipment suitability and accuracy, but also from the skillness of the operator. Methods suitable for a constant monitoring system in the equipment here presented are contactless methods (holography, thermography, TV camera imaging) and sensor methods (ultrasound and its C-scan type, acoustic emission). Although used in many cases, strain gauges and data processing systems are not presented here, since much references are exist already. Some basic properties of elaborated methods are listed in the following table.

Metoda	Veličina koja se meri	Tipični diskontinuitet	Primer primene	Prednosti	Ograničenja
Holografija	Pomeranja i mehaničke deformacije	Razdvajanje, raslojavanje, plastična deformacija	Sačaste konstrukcije, kompoziti, pneumatici, precizni delovi (elementi ležajeva)	Izuzetno osetljiva, daje sliku deformacija; permanentni zapis po potrebi	Skupa; složena; zahteva dobru uvežbanost operatora
Termografija	Toplotno zračenje	Pojave vezane za neravnomernu raspodelu temperature, kondenzacija, propuštanje	Građevinske konstrukcije, oprema u pogonu, električne instalacije, cevovodi	Jednostavna primena na konstrukcijama i analiza dobijenog termograma, dostupna oprema	Može biti potreban termogram početnog stanja
Akustična emisija	Talasna energija napona usled rasta prsline, područja visokog mehaničkog napona, propuštanja	Prsline, plastične deformacije, propuštanje, raslojavanje, lom vlakana i otkaz matrice u kompozitima	Otkrivanje i položaj prsline, rast prsline, kompoziti, metalne konstrukcije, rotirajuća oprema	Prostorno ispitivanje složenih geometrijskih oblika; osetljiva; permanentni zapis moguć; tačan položaj prsline	Konstrukcija mora biti opterećena; senzori moraju biti u dodiru sa površinom
Ultrazvuk	Promena akustične impedanse	Prsline, šupljine, poroznost, travavost, raslojavanje i uključci	Zavareni spojevi, ploče, cevi, odlivci, otkovci, vučeni proizvodi, merenje debljine	Izuzetno prodorna; lako se automatizuje; dobra osetljivost i rezolucija; moguć trajni zapis	Zahteva akustični spoj sa površinom; potrebni su referentni standardi; zavisi od obučenosti operatora; neosetljiva na prsline koje su paralelne zraku zvuka
Merne trake	Pomeranja i mehaničke deformacije	Ne koriste se za otkrivanje diskontinuiteta	Analiza napona i deformacija većine konstrukcija	Mala cena; pouzdana	Neosetljiva na pretrpljenu deformaciju; pokriva malu površinu; treba je lepiti

Method	Measured value	Typical discontinuity	Application example	Advantages	Limitations
Holography	Displacement and mechanical deformation	Separation, delamination, plastic deformation	Honeycomb structures, composites, pneumatics, precise parts (bearing elements)	Very sensitive, produces deformation image, permanent record if required	Expensive, complex, requires very skilled personnel
Thermography	Heat radiation	Phenomena connected to irregular temperature distribution, condensation, leakage	Civil engineering structures, equipment in operation, electrical installation, pipelines	Simple use on structures and analysis of thermogram, attainable equipment	Thermogram of initial state could be required
Acoustic emission	Stress wave energy of crack growth, region of high mechanical stress, leakage	Cracks, plastic deformation, leakage, delamination, fibre fracture and matrix failure in composites	Detection and location of crack, crack growth, composites, metal structures, rotating equipment	Spatial testing of complex geometries, sensitive, permanent record possible, accurate crack location	Structure must be loaded, sensors should have close contact on the surface
Ultrasound	Change of acoustic impedance	Cracks, voids, porosity, bands, delamination and inclusions	Welded joints, plates, tubes, castings, forgings, rolled products, thickness measurement	Very penetrative, easy to be automatized, good sensitivity and resolution, permanent record possible	Requires acoustic contacts with the surface, referent standards are necessary, depends on operator's skill, insensitive for cracks parallel to sound ray
Strain gauges	Displacements and mechanical deformations	Not used for discontinuity detection	Stress and strain analysis of most structures	Low prices, reliable	Insensitive to experienced deformation, covers small area, should be glued

Pristup prikazan u predavanjima je u fazi neprekidnog razvoja, pa se ni ovde obrađene metode ne mogu smatrati konačnim odgovorom za praćenje stanja konstrukcija.

Razvoj elektronike i softverskih programa donosi nova rešenja i potrebno je dobro poznavanje mogućnosti razvijenih sistema radi njihove uspešne primene. Tome treba da posluži i ovaj broj časopisa.

The approach presented in the lectures is under steady development, and so here considered methods cannot be taken as the final response for structural state monitoring.

Development of electronics and software packages brings new solutions and the solid knowledge of developed system capacity is a precondition for their successful use. This issue should contribute to this.

S. Sedmak