

Nebojša Đuranović¹

ISPITIVANJE STANJA NAPONA METODOM ZAOSTALIH NAPONA – IDEJA I PRIMJENA KOD ARMATURA I KABLOVA

Rezime:

Mjerenje stanja napona u postojećim konstrukcijama ne može se sprovesti konvencionalnim procedurama eksperimentalne analize napona, budući da su klasični ekstenzometri i ekstenzometarske metode u potpunosti neosetljivi na predhodnu istoriju opterećenja na samoj konstrukciji, tj. mogu da mjere samo promjenu deformacija koja se desila poslije postavljanja senzora. Jedan od mogućih načina rješavanja problema je put suprotan klasičnom načinu ispitivanja konstrukcija - umjesto da se dodatno opterećuje, konstrukcija (ili njen manji ili veći dio) se rasterećuje. Ovaj članak govori o tome.

Ključne riječi: postojeće stanje napona, eksperiment, metoda otvora, čelik

ESTABLISHING CURRENT STATE OF STRESS USING RESIDUAL STRESS METHOD – IDEA AND USE IN REINFORCEMENTS

Summary:

Defining state of stress of existing structures can not be performed using well established methods of experimental stress analysis, since these methods are insensitive to the history of loading prior to the sensors being placed on the structure. One possible way to solve the problem is to go in opposite direction to classical methods of experimental testing – instead of loading the structure we should unload it, or part of it. This paper deals with that approach.

Key words: current state of stress, experiment, method of hole drilling, steel

¹ Dr, vanredni profesor, Građevinski fakultet, Univerzitet Crne Gore, Podgorica

1 UVOD

Termin "*zaostali naponi*" najviše se koristi u mašinstvu, gdje se tehnika određivanja zaostalih napona inicijalno i razvila. Međutim, ista tehnika se može primjenjivati i u građevinarstvu - i to ne samo za određivanje zaostalih napona (koji u građevinskim konstrukcijama obično nemaju taj značaj kao u mašinskim), već i za određivanje postojećeg, trenutnog, stanje napona u konstrukciji, za koju nemamo poznatu niti istoriju, niti veličinu nanijetog opterećenja, a ponekad čak ni jasno definisan konstruktivni sistem. Direktna primjena tehnike - onako kako je razvijena u mašinstvu ostvaruje se kod metalnih konstrukcija, dok kod betonskih konstrukcija imamo njenu implementaciju - uz određene specifičnosti - prvenstveno povezano sa nehomogenošću i ostalim karakteristikama tipičnim za materijal poput betona.

Zaostali (smrznuti) naponi u konstrukcijama su oni naponi koji postoje u objektu prije nanošenja bilo kakvog opterećenja. Glavni izvor zaostalih napona obično je sam proces proizvodnje posmatranog elementa konstrukcije. U principu, izlivanja, varenja, mašinske obrade, toplotni tretmani, druge temperaturne obrade i tome slično, predstavljaju glavne izvore zaostalih napona. U pojedinim situacijama ovakvi naponi mogu biti unijeti u konstrukciju i kroz proces montaže ili instalacione procedure, kroz dodatna opterećenja, slijeganja tla u podzemnim konstrukcijama, ili čak kroz razna stalna opterećenja koja su vremenom postala sastavni dio konstrukcije. Efekti zaostalih napona mogu biti korisni ili štetni po konstrukciju, zavisno od njihove veličine, znaka, raspodjele napona u odnosu na napone koji su izazvani samim spoljnim opterećenjem, itd. Zaostali naponi obično su nepogodni - postoje mnogi dokumentovani slučajeva kada su ovi naponi bili glavni faktor koji je doveo do loma konstrukcije.

Postojeći, kao i zaostali naponi, zavise od istorije prethodnog opterećenja objekta - počev od izrade konstrukcije (npr. temperaturni naponi u masivnom betonu, usled tehnoloških postupaka izgradnje itd.) kao i od opterećenja nanijetih tokom eksploatacije objekta. Za razliku od predhodno pomenutih, ukupno stanje napona u konstrukciji je posledica ukupnog dejstva stalnog opterećenja, faktora poput načina montaže i izvođenja, kao i eksploatacionog (korisnog i ostalog) opterećenja.

Mjerenje zaostalih napona ili trenutnog stanja napona u postojećim konstrukcijama i elementima ne može se sprovesti konvencionalnim procedurama eksperimentalne analize napona, budući da su klasični ekstenzometri i ekstenzometarske metode (kao što su mjerne trake, metoda foto elastičnosti i tome slično) u potpunosti neosetljivi na predhodnu istoriju opterećenja na samoj konstrukciji, tj. mogu da mjere samo promjenu deformacija koja se desila poslije postavljanja senzora.

Uslijed toga, jedan od mogućih načina rješavanja problema je put suprotan klasičnom načinu ispitivanja konstrukcija - umjesto da se dodatno opterećuje, konstrukcija (ili njen manji ili veći dio) se rasterećuje. Analagno tome, kada se mjerenje zaostalih napona sprovodi korišćenjem standardnih ekstenzometara, zaostali (ili postojeći) naponi moraju biti na neki način relaksirani, tj. "oslobodeni", pri čemu ekstenzometri moraju biti unaprijed postavljeni, kako bi registrovali promjenu deformacije koja je prouzrokovana uklanjanjem postojećih (zaostalih) napona. Znači,

ako su, prije uklanjanja dijela ispitivanog elementa, ekstenzometri pravilno postavljeni oni će biti u mogućnosti da zabilježe (povratne) deformacije koje je prouzrokovalo uklanjanje tog dijela elementa, jer u tom novonastalom stanju uklonjeni dio elementa neće biti opterećen. Početno (nulto) stanje napona i deformacija može se zatim uporediti sa stanjem izmjerenim nakon vađenja ili uklanjanja dijela posmatranog elementa iz konstrukcije - a njihova razlika će predstavljati stanje koje je vladalo u konstrukciji prije početka ispitivanja, tj. stanje pod postojećim opterećenjem. Pri tome, analizu je neophodno izvršiti koristeći postulate elastičnog ponašanja materijala u konstrukcije.

U tekstu koji slijedi, kada se koristi termin zaostali naponi govori se u stvari o principima koji se direktno koriste kod ispitivanja čeličnih konstrukcija (pri čemu se podrazumjeva da se ne govori samo o zaostalim naponima, već se izlaganje odnosi i na određivanje postojećeg stanja napona od bilo kog postojećeg opterećenja - uključujući i eventualne zaostale napone), tj. o principima koji se mogu implementirati i na betonskim konstrukcijama - prvenstveno za definisanje postojećeg stanja napona u konstrukciji.

2 ODREĐIVANJE STANJA NAPONA FORMIRANJEM OTVORA

Najprimjenjivija tehnika za određivanje zaostalih (engleski: *residual stresses*) ili postojećeg stanja napona u konstrukciji je pomoću mjernih traka postavljenih u okolini novoformiranog otvora na konstrukciji. Metoda se bazira na mjerenju posljedica relaksacije napona u okolini novoformiranog otvora.

Procedura utvrđivanja trenutnog stanja napona (tj. "zaostalih" napona) na ovaj način sastoji se od 6 sledećih koraka:

1. Na mjesto na ispitivanom elementu za koje je potrebno odrediti stanje napona postavlja se, obično, specijalna troelementska rozeta mjernih traka;
2. Rozete se spaja u mjerno kolo;
3. Instalira se instrument za bušenje otvora u ispitivanom elementu, tačno iznad mjesta gde je na rozeti označeno mjesto gdje treba formirati otvor;
4. Nakon što se očita početno - nulto stanje mjernih traka, na označenom mjestu se, kroz centar rozete mjernih traka, izbuši mali otvor.
5. Nakon toga se izvrši mjerenje dilatacija;
6. Iz veličina izmjerenih dilatacija, koristeći izraze za veze napona i deformacija kao i procedure obrade podataka, sračunaju se glavni naponi i ugao njihovog djelovanja. Tako sračunate naponsko-deformacione karakteristike odgovaraju stanju napona u konstrukciji prije nego je formiran otvor.

Prethodno opisana procedura je prilično jednostavna. Kvalifikovano tehničko osoblje može je rutinski upotrebljavati, pri čemu nije potrebno nikakvo posebno specijalističko znanje. Upotrebe metode su veoma raznovrsne i ona se može sprovesti kako u laboratoriji, tako i in-situ, na stvarnim konstrukcijama.

Ova tehnika spada u grupu poludestruktivnih metoda ispitivanja konstrukcija, budući da otvor koji se stvara prilikom ispitivanja u većini situacija neće značajno uticati na integritet ispitivane konstrukcije. Sama veličina otvora (prečnik i dubina), kod ispitivanja čeličnih elemenata se kreće od 1 - 5 mm (1).

Nakon ispitivanja na čeličnim konstrukcijama poželjno je ukloniti formirani otvor, i to tako što će površina na kojoj je otvor napravljen biti lagano izbrušena i išmirglana. Ovo mora biti urađeno veoma pažljivo, da bi se izbjeglo neželjeno unošenje dodatnih napona u konstrukciju.

Metoda najbolje rezultate daje ako su naponi isti po cijeloj dubini otvora, ili su, u najgorem slučaju, približno ravnomjerno raspoređeni po njoj. Zbog toga se pri primjeni metoda zahtjeva pažljiv, inženjerski pristup kako bi se potvrdila pretpostavka o ovakvoj raspodjeli napona po visini, ali i zbog zadovoljavanja ostalih uslova koji su preduslov kvalitetnog mjerenja. Pri tome, sama procedura prikupljanja i analize podataka je prilično precizna i direktna.

2.1 OSNOVNI PRINCIPI METODE

Bušenje otvora, čak i veoma malog prečnika, u elementu koji je napregnut dovodi do relaksacije napona na posmatranom mjestu. Eliminacija napona koji postoje na mjestu otvora, mijenja stanje napona u njegovom neposrednom okruženju, prouzrokujući da se i lokalne deformacije na površini promjene u skladu sa tim. Ovaj princip predstavlja osnovu metode određivanja zaostalih napona formiranjem otvora, i ona je prvi put predložena još 1934. godine od strane J. Mathar-a, što je publikovala ASME.

U većini praktičnih primjena ove metode sami izbušeni otvor je "slijep" (engleski: *blind-hole*), tj. formiran je samo na jednoj strani ispitivanog elemenata, a ne po cijeloj dubini elementa. Pri tome, dubina otvora je otprilike koliko i njegov prečnik, pri čemu ona mora biti mala u odnosu na debljinu ispitivanog objekta.

Nažalost, geometrijski uslovi ostvareni formiranjem "slijepog" otvora su veoma kompleksni, tako da teorija elastičnosti ne nudi rješenje problema u zatvorenom obliku, koje bi poslužio za direktno određivanje zaostalih napona iz izmjerenih dilatacija. Zato se, uz rezultate mjerenja, za rješavanje problema moraju koristiti i empirijski određeni koeficijenti. Zatvoreno rješenje može se dobiti samo za jednostavnije slučajeve geometrije i oblike otvora; recimo otvor kroz tanku ploču - pri čemu otvor izbija na obadviije strane uzorka (engleski: *through-hole*), i to samo kada imamo nepromjenjive (konstantne) napone po cijeloj dubini otvora.

Iz ovog razloga, uobičajeno je da se teoretska osnova metode bušenja otvora prvo razvije za otvor koji izlazi na obje strane posmatranog elementa, i kasnije proširi na predhodno opisani (i mnogo primjenjivani) slučaj "slijepog" otvora.

3 SPECIFIČNOSTI KOD METALNIH KONSTRUKCIJA, ARMATURE I KABLOVA ZA PREDHODNO NAPREZANJE

Čelični konstruktivni elemenat koji je izložen dejstvu stalnog opterećenja ima ukupni napon koji čine eventualni zaostali naponi iz procesa proizvodnje i naponi usled samog opterećenja. Eventualni zaostali napon se, u slučaju potrebe može jednostavno dodati proračunatom naponu od spoljnog opterećenja, kako bi se sračunao ukupni napon.

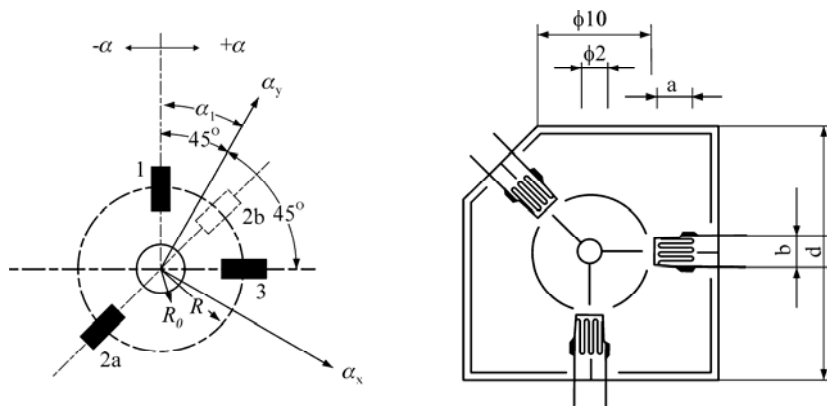
Kod primjena metode formiranja otvora pri ispitivanju **metalnih građevinskih elemenata**, koristi se procedura identična upravo objašnjenoj. Kod njih standardna rozeta za određivanje zaostalih napona ima u sebi otvor reda veličine 1 do 5 mm i može se koristiti za analizu napona za dubine 0.5 do 5 mm. Kada se želi ustanoviti stanje napona na većim dubinama, treba formirati veći otvor. Tako, uz uslov da nema diskontinuiteta u elementu u oblasti koja trpi promjene usled formiranja otvora, za određivanje napona na mjestima koja se nalaze na većoj dubini u elementu (preko 30mm) koriste se otvori i veći od 50 mm.

U cilju određivanja **postojećeg stanja napona u čeličnoj armaturi ili kablovima za prednaprezanje**, potrebno je izbušiti otvor prečnika oko 1,5 mm, do dubine od 1 mm pri čemu će deformacije biti mjerene sa minijaturnim elektrootpornim mjernim trakama, slika 1.



Slika 1 - Postavljanje rozete za određivanje stanja postojećeg stanja napona u armaturi i kablovima za prednaprezanje (2)

Moguća procedura za mjerenje postojećeg stanja (tj. zaostalih) dilatacija je da se postavi rozeta tri mjerne trake oko mjesta gde će se bušiti otvor. Takva rozeta je šematski prikazana na slici 2., na kojoj se vidi da su tri radijalno postavljene mjerne trake locirane tako da im se centri poklapaju sa tačkom za koju se vrše mjerenja, i da su sve tri postavljene na udaljenju "R" mjereno od centra otvora koji treba formirati.



Slika 2 - Rozeta mjernih traka za određivanje stanja napona (3)

Iako uglovi između mjernih traka mogu biti proizvoljno određeni (ali moraju biti poznati) uobičajeno je da se za ovu vrstu mjerenja, zbog jednostavnosti analitičkih izraza, koriste rozete kod kojih su mjerne trake postavljene pod međusobnim uglom od 45° - pravougaone rozete. Kako je prikazano na slici 2, α_1 je ugao bliže glavne ose u odnosu na mjernu traku 1, dok su $\alpha_2 = \alpha_1 + 45^\circ$ i $\alpha_3 = \alpha_1 + 90^\circ$, pri čemu su pozitivni uglovi izmjereni u pravcu označavanja mjernih traka.

I kod ovakvih primjena, bušenje malih otvora može se smatrati polu destruktivnim metodama, jer smanjenje poprečnog presjeka u ovakvim situacijama iznosi oko 8% za žicu koja je prečnika 5 mm, tj. oko 4% za žicu koja je prečnika 7 mm.

Kod ovakvih mjerenja posebno je značajno obezbijediti precizno postavljanje instrumenata, mjernih traka kao i samo bušenje otvora. Pri tome, treba koristiti kvalitetne bušilice koje ne proizvode dodatne napone u ispitivanom uzorku. Preciznost određivanja napona u armaturi na ovaj način obično je reda veličine do ± 7 MPa, pri čemu **greška** ide do $\pm 3\%$ od ukupnog čitanja.

ZAKLJUČAK

Mjerenje parametara trenutnog stanja napona u postojećim konstrukcijama i elementima ne može se sprovesti konvencionalnim procedurama eksperimentalne analize napona. U radu je predstavljena metoda koja omogućava da se takvo ispitivanje sprovede. Metoda »bušenja otvora« vodi porijeklo iz oblasti mašinstva, ali se može efikasno primijeniti i u oblasti građevinskih konstrukcija. Zasnovana je na činjenici da na uzorku koji je izvađen iz konstrukcije, ili neposredno na mjestu gdje se u konstrukciji formira otvor, dolazi do relaksacije napona koja je po svojoj veličina uporediva sa stanjem napona prije otpočinjanja eksperimenta.

LITERATURA

- [1] *Informacije sa Interneta*, Razni proizvođači opreme, 2006;
- [2] *Katalog proizvođača opreme i servisa*, STRAINSTALL, UK, 2004;
- [3] *Eksperimentalne metode u projektovanju konstrukcija* / V. Brčić, R. Čukić/Građevinska knjiga, 1988;